



Rijksinstituut voor Volksgezondheid  
en Milieu  
*Ministerie van Volksgezondheid,  
Welzijn en Sport*

## **Invloed van procesintensificatie op omgevingsveiligheid**

RIVM-rapport 2020-0111  
M.F. van de Ven | E.C.J. Geus





Rijksinstituut voor Volksgezondheid  
en Milieu  
*Ministerie van Volksgezondheid,  
Welzijn en Sport*

## **Invloed van procesintensificatie op omgevingsveiligheid**

RIVM-rapport 2020-0111

## Colofon

© RIVM 2020

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), de titel van de publicatie en het jaar van uitgave.

DOI 10.21945/RIVM-2020-0111

M.F. van de Ven (auteur), RIVM  
E.C.J. Geus (auteur), RIVM

Contact:  
Mark van de Ven  
Centrum Veiligheid  
mark.van.de.ven@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat in het kader van de jaarlijkse onderzoeksopdracht Omgevingsveiligheid.

Dit is een uitgave van:  
**Rijksinstituut voor Volksgezondheid  
en Milieu**  
Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven  
Nederland  
www.rivm.nl

## Publiekssamenvatting

### **Invloed van procesintensificatie op omgevingsveiligheid**

In de industrie worden in het proces- en installatieontwerp innovatieve benaderingen bedacht om grondstoffen en materialen efficiënter te gebruiken. Dat kan resulteren in aanzienlijk kleinere, schonere en meer energie-efficiënte technologie. Deze zogeheten procesintensificatie kan ook een manier zijn om industriële processen met gevaarlijke stoffen veiliger te maken. Het RIVM beschouwt 14 van deze procesintensificatietechnologieën als 'kansrijk' om omgevingsrisico's te verminderen. Het heeft hiervoor 69 wereldwijd ontwikkelde procesintensificatietechnologieën bekeken. De technologieën worden nog weinig in de praktijk gebruikt.

Procesintensificatie kan op verschillende manieren de omgevingsrisico's verminderen. Het zou de kans op een ongeval kunnen verkleinen door de installatie veiliger te ontwerpen. Door de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie te verminderen zijn de effecten van een ongeval op de omgeving bovendien kleiner. Verder zouden met procesintensificatie kleinere installaties kunnen worden gebouwd dicht bij producent of afnemer van de gevaarlijke stoffen. Door gevaarlijke stoffen minder te vervoeren, nemen de risico's voor de omgeving af. Een mogelijk nadeel van procesintensificatie kan zijn dat de procesvoering complexer wordt, waardoor risico's ook groter kunnen worden.

Beleidsmakers kunnen de resultaten uit dit onderzoek van het RIVM gebruiken om instrumenten te ontwikkelen die risico's voor de omgeving voorkomen of verkleinen. Dit kan bijvoorbeeld door procesintensificatieveiligheidsstudies te ondersteunen, of door eerste toepassingen in de praktijk te stimuleren. Ze kunnen bedrijven en toezichthouders er op wijzen dat procesintensificatie een manier is om de veiligheid bij risicovolle bedrijven continu te verbeteren.

Dit onderzoek is uitgevoerd in opdracht van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW).

Kernwoorden: procesintensificatie, omgevingsveiligheid, procesveiligheid, inherente veiligheid, inherent veiliger, safe-by-design, gevaarlijke stoffen, stand der techniek, best beschikbare techniek.



## Synopsis

### **Impact of process intensification on a safe living environment**

Innovative approaches to the design of industrial processes and installations are being based on more efficient use of raw materials, and materials in general. It can lead to substantially smaller, cleaner and more energy efficient technology. This 'process intensification', as it is known, can also be used to make industrial processes involving dangerous goods safer. RIVM deems 14 of these process intensification technologies to be 'promising' when it comes to promoting a safe living environment. It looked at 69 globally-developed process intensification technologies before arriving at this conclusion. The application of these technologies is still limited.

Process intensification can reduce environmental risks in different ways. By promoting the design of safer installations, it can lower the probability of accidents and by decreasing the quantity of dangerous goods in an installation, it can reduce the effects that accidents have on the environment. With process intensification, furthermore, smaller installations can be setup close to producers or end-users of dangerous goods. Environmental risks are reduced when dangerous goods are not transported. A disadvantage of process intensification is that it may make a process more complex or be more sensitive to process faults or deviations, so that the risks may also become greater.

Policymakers can use the results of this research by RIVM to develop instruments that prevent, or reduce, these risks for the surroundings by, for example, supporting process intensification safety studies or by stimulating practical application. They can inform competent authorities that process intensification can be a way to continuously improve safety at high-risk companies.

This research was commissioned by the Dutch Ministry of Infrastructure and Water Management (IenW).

Keywords: process intensification, process safety, industrial and environmental safety, inherent safety, dangerous goods, best available technology.





## Inhoudsopgave

### **Samenvatting — 9**

#### **1 Inleiding — 11**

- 1.1 Aanleiding — 11
- 1.2 Doelstelling — 11
- 1.3 Resultaten — 11
- 1.4 Scope — 12

#### **2 Procesintensificatie in de context van veiligheid — 13**

- 2.1 Het begrip procesintensificatie — 13
- 2.2 Inherent veiligere processen en installaties (Safe-by-Design) — 13
- 2.3 Procesveiligheid en de hiërarchie van veiligheidsmaatregelen — 14
- 2.4 Omgevingsveiligheid — 15
  - 2.4.1 Kwantitatieve risicoanalyse (QRA) — 16
  - 2.4.2 Stand der techniek en best beschikbare techniek (BBT) — 16
  - 2.4.3 Continue verbetering — 17
- 2.5 Algemene beschrijving van de invloed op omgevingsveiligheid — 17
  - 2.5.1 Impact op de effecten — 17
  - 2.5.2 Impact op de kans van optreden — 17
  - 2.5.3 Procesintensificatie in relatie tot andere risicorelevante activiteiten — 17
  - 2.5.4 Afweging van de voor- en nadelen — 18

#### **3 Potentie van individuele procesintensificatie-technologieën — 19**

- 3.1 Identificatie van procesintensificatie-technologieën — 19
- 3.2 Beoordelingsmethode — 19
  - 3.2.1 Positieve invloed op omgevingsveiligheid — 19
  - 3.2.2 Beoordeling marktrijpheid — 21
- 3.3 Resultaten — 21

#### **4 Kwantitatieve beoordeling van een praktijkcasus — 23**

#### **5 Conclusies en aanbevelingen — 25**

#### **6 Referenties — 27**

#### **Bijlage 1 Kwalitatieve beoordeling van de invloed op de omgevingsveiligheid per procesintensificatie-technologie — 29**



## Samenvatting

Procesintensificatie is het toepassen van nieuwe benaderingswijzen in het proces- en installatieontwerp van de (petro)chemische industrie met het doel om efficiënter om te gaan met (fossiele) energiedragers, grondstoffen en materialen. Naast deze primair bedrijfsmatige voordelen kan procesintensificatie ook een manier zijn om industriële processen met gevaarlijke stoffen aan de voorkant inherent veiliger te maken. Een efficiënter en veiliger proces- of installatieontwerp draagt in potentie bij aan het verminderen van de veiligheidsrisico's naar de omgeving. Zowel door de effecten van ongevalsscenario's met gevaarlijke stoffen te beperken als door de kans van optreden van deze ongevalsscenario's te verkleinen. Omdat procesintensificatie ook kan leiden tot in omvang kleinere chemische installaties in vergelijking tot conventionele installaties biedt de nieuwe procesintensificatie-technologie de flexibiliteit om kleinere productie-eenheden te realiseren in de directe nabijheid van de (groot)afnemer van de producten. Een dergelijke ontwikkeling vermindert het transport van gevaarlijke stoffen en de omgevingsrisico's die daarmee samenhangen.

Het is wel belangrijk ook de mogelijke veiligheidsnadelen van procesintensificatie te onderkennen. Bijvoorbeeld omdat procesintensificatie kan leiden tot een meer complexe procesvoering.

Het RIVM heeft uit een overzicht van 69 wereldwijd ontwikkelde procesintensificatie-technologieën onderzocht welke procesintensificatie-technologieën voordelen kunnen bieden voor de omgevingsveiligheid. Uit dit onderzoek worden veertien procesintensificatie-technologieën kansrijk bevonden om omgevingsrisico's te reduceren.

Het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat kan de resultaten van dit onderzoek gebruiken voor de verdere beleidsvorming op het onderwerp procesintensificatie. Bij voorkeur wordt procesintensificatie daarbij in samenhang met inherente veiligheid (safe-by-design) gezien. Daarbij kan gedacht worden aan:

- Het ondersteunen van veiligheidsstudies, die verder inzicht geven in de impact van kansrijke procesintensificatie-technologieën op de omgevingsveiligheid.
- Het stimuleren van de eerste toepassing van procesintensificatie in situaties waar de huidige omgevingsrisico's zodanig zijn dat vermindering daarvan gewenst is.
- Bedrijven en bevoegd gezag wijzen op procesintensificatie als een mogelijkheid om invulling te geven aan de wettelijke verplichting om de beheersing van zware ongevallen continue te verbeteren.



# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding

Procesintensificatie is het toepassen van nieuwe benaderingswijzen in proces- en installatieontwerp. Dit kan door het combineren van processtappen in één apparaat of procesgang, door het toepassen van nieuwe (geïntensiveerde) unit operations of door een integraal procesherontwerp. Procesintensificatie kan voor de bedrijven verschillende voordelen opleveren op gebied van proces-, keten- en energie-efficiency, kapitaal- en bedrijfskosten, productkwaliteit en/of procesveiligheid [1][2].

Naast deze primair bedrijfsmatige voordelen kan procesintensificatie in potentie ook een publiek belang dienen. De hypothese is dat de veiligheidsrisico's voor de omgeving van een (petro)chemische productielocatie afnemen wanneer met procesintensificatie de hoeveelheid gevaarlijke stoffen op een bedrijfslocatie significant wordt gereduceerd, of wanneer met procesintensificatie een risicorelevante installatie inherent veiliger wordt ontworpen. Anderzijds is het wellicht mogelijk om met behulp van procesintensificatie een conventionele grootschalige centrale productie te vervangen door kleinschalige productie van gevaarlijke stoffen direct bij de afnemers waarmee naast inherent veiliger ontwerp ook transportrisico's tussen producent en afnemers kunnen worden vermeden.

Om de introductie van procesintensificatie te stimuleren is de MIA/VAMIL Milieulijst 2017 [3] in opdracht van het ministerie van Infrastructuur en Milieu uitgebreid met nieuwe categorieën voor lokale productie ofwel continue productie van gevaarlijke stoffen. Hierdoor is het mogelijk om in aanmerking te komen voor subsidie wanneer transport of opslag van gevaarlijke stoffen aanzienlijk gereduceerd wordt.

Een beoordeling of en in hoeverre procesintensificatie daadwerkelijk een positief effect kan hebben op omgevingsveiligheid is nog niet eerder onderzocht en vormt daarom de aanleiding voor dit onderzoek.

## 1.2 Doelstelling

De doelstelling van dit onderzoek is om inzicht te verkrijgen of en zo ja, welke procesintensificatie-technologieën een positieve bijdrage aan omgevingsveiligheid kunnen leveren. Dit inzicht vormt een basis voor verdere beleidsvorming en geeft richting voor verder onderzoek.

## 1.3 Resultaten

Om bij te dragen aan de doelstelling zijn er op hoofdlijnen drie resultaten voorzien in dit rapport.

Ten eerste is er, op basis van literatuurstudie, duiding gegeven aan het begrip procesintensificatie, hoe deze zich verhoudt tot veiligheid en meer specifiek tot omgevingsveiligheid. Het resultaat is beschreven in hoofdstuk 2.

Ten tweede is er een kwalitatieve beoordeling van de potentiële positieve impact van procesintensificatie-technologieën op omgevingsveiligheid uitgevoerd. Als basis hiervoor is een overzicht van de procesintensificatie-technologieën gebruikt dat bij de Europese Roadmap voor Procesintensificatie in 2007 is opgesteld [1]. Uit overleg met verschillende kennishouders [4] is geconcludeerd dat deze Roadmap nog steeds voldoende actueel is. Samen met een inschatting van de marktrijpheid van de technologie resulteert dit in een eerste kwalitatieve schifting tussen procesintensificatie-technologieën waarvan meer of minder positief effect mag worden verwacht. De beoordelingsmethode en een analyse van de resultaten is beschreven in hoofdstuk 3. De uitgewerkte beoordeling per procesintensificatie-technologie zelf is opgenomen in Bijlage 1.

Daarnaast was er voorzien om voor een aantal geselecteerde praktijkcasussen meer kwantitatief vast te stellen wat de impact op omgevingsveiligheid is en eventuele drempels voor de introductie te inventariseren. In hoofdstuk 4 is een toelichting opgenomen waarom dit gewenste resultaat niet is bereikt.

Het rapport sluit af met conclusies en aanbevelingen in hoofdstuk 5.

#### **1.4 Scope**

De focus van het rapport ligt bij de impact van procesintensificatie op specifiek de omgevingsveiligheid. Dat betekent dat, ook wanneer er in dit rapport wordt geconcludeerd dat de impact op de omgevingsveiligheid beperkt is, procesintensificatie -technologieën de veiligheid op procesniveau en voor de werknemer nog steeds kunnen verbeteren.

Hetzelfde geldt voor andere potentiële winsten, zoals kosteneffectiviteit, vermindering van energiegebruik, grondstoffen of afval en de uiteindelijke impact op milieu en gezondheid.

Voor dit onderzoek is gebruik gemaakt van informatie aangedragen door verschillende kennishouders [4] en van openbare literatuur zoals opgenomen in de referentielijst.

## 2 Procesintensificatie in de context van veiligheid

In dit hoofdstuk wordt het begrip procesintensificatie gedefinieerd en in de context van veiligheid geplaatst. Procesintensificatie is een manier om industriële processen met gevaarlijke stoffen inherent veiliger te maken en bevindt zich hoog in hiërarchie van veiligheidsmaatregelen. Met procesintensificatie kan invulling worden gegeven aan de wettelijke eis om de beheersing van zware ongevallen continu te verbeteren.

Procesintensificatie kan een positieve bijdrage leveren aan omgevingsveiligheid. Enerzijds door de kans van optreden van een ongevalsscenario te verkleinen en anderzijds door de effecten op de omgeving te beperken. Verder kan het een positieve uitwerking hebben in de verdere keten van productie en transport van een gevaarlijke stof. Procesintensificatie kan anderzijds ook nieuwe of grotere risico's toevoegen. Het is belangrijk dat naast de mogelijke voordelen ook de mogelijke nadelen worden afgewogen en daarom is in dit hoofdstuk een aantal voorbeelden genoemd.

### 2.1 Het begrip procesintensificatie

De term procesintensificatie is sinds de jaren tachtig van de vorige eeuw in opkomst in de chemische procesindustrie [2]. In die beginjaren werd het vooral geïnterpreteerd als '*een significant compactere procesinstallatie*'. Tegenwoordig vindt men die definitie te smal en definieert men procesintensificatie meer holistisch als: '*het toepassen van innovatieve apparatuur, procestechnieken en procesontwikkelingsmethoden die, in vergelijking tot conventionele processen, resulteren in substantiële verbetering in de (bio)chemische productie en procestechnologie*' [2].

Vanuit deze ruime definitie volgt dat procesintensificatie gericht is om te komen tot [2]:

- goedkopere processen;
- kleinere apparatuur/installaties;
- veiligere processen;
- minder energieverbruik;
- kortere doorlooptijd (time-to-market);
- minder afval-/bijproducten;
- beter imago van chemische procesvoering.

Procesintensificatie kan worden beschouwd als een invulling van één van de vijf strategieën om industriële processen *inherent veiliger* te maken; een begrip dat in de volgende paragraaf wordt toegelicht.

### 2.2 Inherent veiligere processen en installaties (Safe-by-Design)

Het begrip inherente veiligheid wordt al sinds de jaren zeventig van de vorige eeuw toegepast binnen de chemische procesindustrie [7]. Inherent veiliger ontwerpen, bedrijven en wijzigen van een proces is het zo veel als mogelijk vermijden, elimineren of reduceren van de procesrisico's in plaats van het beschermen daartegen met 'toegevoegde maatregelen'. Er wordt onderscheid gemaakt tussen de volgende vier strategieën [8]:

- vermijden van gevaarlijke stoffen of condities (vervangen);
- minimaliseren van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen (verminderen);
- gebruik van gevaarlijke stoffen onder minder gevaarlijke condities (verzwakken);
- reduceren van kansen op fouten (vereenvoudigen).

In een project van de provincies over inherente veiligheid<sup>1</sup> is daar nog één strategie aan toegevoegd:

- verbeteren van logistiek en lay-out.

Deze aanvulling heeft betrekking op het ketenbeheer van aan- en afvoer van gevaarlijke stoffen en op de lay-out en transport binnen de inrichting zelf.

Overigens is het meer passend om te spreken van een *inherent veiliger* proces of installatie in plaats van het absoluut te beschouwen (inherent veilig). Chemische processen en installaties hebben meerdere gevaarsaspecten en het is in de regel niet mogelijk om alle gevaren volledig te elimineren.

*Safe-by-Design* is verwant aan inherente veiligheid. *Safe-by-Design* houdt in dat veiligheid in een zo vroeg mogelijk stadium van product- en procesontwikkeling wordt meegewogen. Het is bedoeld om milieurisico's te voorkomen en een schone, gezonde en veilige leefomgeving te realiseren. *Safe-by-Design* maakt deel uit van het milieubeleid waar de overheid op inzet<sup>2</sup>.

### 2.3 Procesveiligheid en de hiërarchie van veiligheidsmaatregelen

Inherent veiliger en procesintensificatie zijn geen op zichzelf staande concepten. Ze vormen binnen het werkveld van procesveiligheid een essentieel onderdeel van de *hiërarchie van veiligheidsmaatregelen* [9] (in het Engels ook wel *hierarchy of controls* of *safety decision hierarchy* genoemd). Deze hiërarchie geeft aan dat er een voorkeursvolgorde is in de afweging van verschillende risicoreducerende maatregelen (zie Figuur 1). Het begint met inherent veiliger maken van de risicobron (inclusief procesintensificatie), daarna via het nemen van ruimtelijke maatregelen (segregeren) en vervolgens door het toepassen van passieve en actieve technische maatregelen. Als laatste resteren dan de organisatorische maatregelen om de veiligheidsrisico's te beheersen.

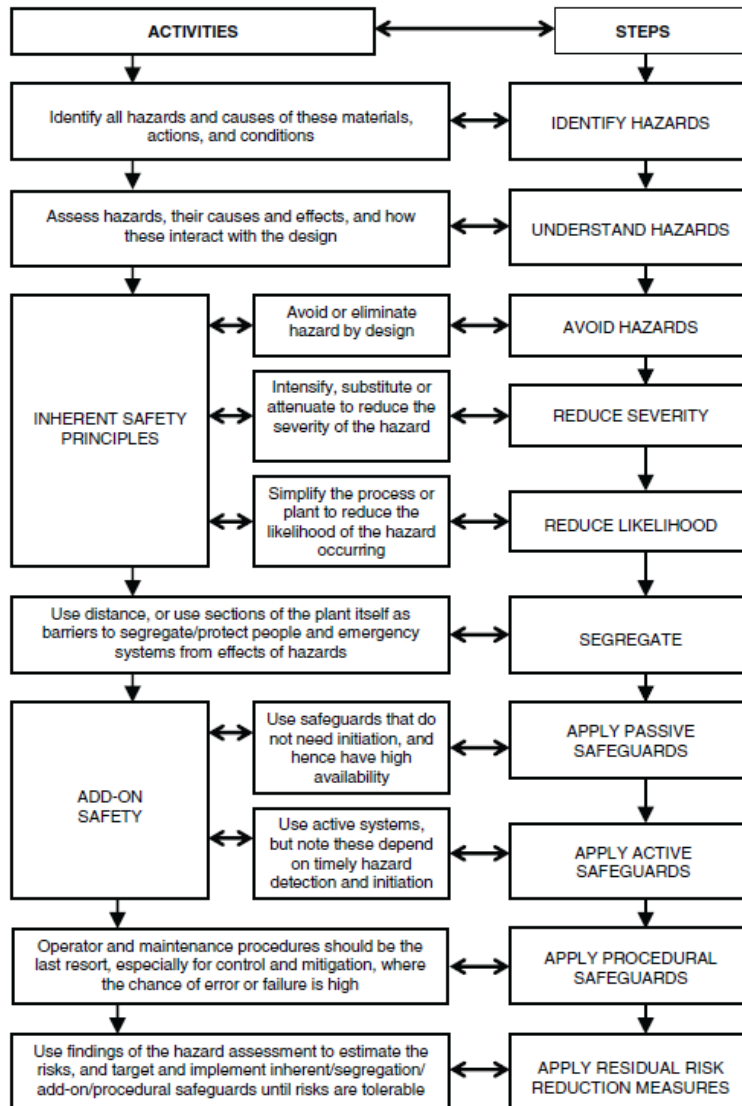
De hiërarchie komt sterk overeen met wat bij arbeidsveiligheid ook wel bekend staat als de *arbeidshygiënische strategie* [10]. De Arboret verlangt dat ter bescherming van de werknemer eerst naar bronmaatregelen wordt gekeken, dan naar collectieve maatregelen (die

<sup>1</sup> Een projectgroep bestaande uit de provincies Noord-Brabant, Zeeland, Zuid-Holland, Noord-Holland en Limburg en de DCMR Milieudienst Rijnmond hebben in de periode 2006-2010 verschillende pilots uitgevoerd om samen met bedrijven te zoeken naar mogelijkheden om hun bedrijfsprocessen veiliger te maken. Daarnaast hebben zij hulpmiddelen ontwikkeld waarmee bedrijven zelf, op basis van vrijwilligheid, aan de slag kunnen met het concept inherente veiligheid. Zie ook: [www.inherenteveiligheid.eu](http://www.inherenteveiligheid.eu).

<sup>2</sup> Met *Safe-by-Design* wil de overheid onderzoekers, ontwerpers en bedrijven stimuleren hun verantwoordelijkheid te nemen om risico's te voorkomen. Beleid gericht op risicobeheersing via wet- en regelgeving blijft onverminderd bestaan. *Safe-by-Design* staat dan ook niet los van ander beleid gericht op een veilige en gezonde leefomgeving. Zie ook: <https://safe-by-design.nl/>



alle werknemers beschermen), vervolgens individuele maatregelen en pas als laatste naar persoonlijke beschermingsmiddelen.



Figuur 1 De hiërarchie van veiligheidsmaatregelen [9].

## 2.4 Omgevingsveiligheid

Veiligheid bij de opslag, gebruik, productie en transport van gevaarlijke stoffen kan in drie onderscheidende 'schillen' worden onderverdeeld: *procesveiligheid*, *interne veiligheid* en vervolgens *omgevingsveiligheid*. Procesveiligheid is gericht op het (technisch) veilig bedrijven van de procesinstallatie, het voorkomen van uitval zonder specifieke aandacht voor de directe omgeving van de installatie. Bij interne of arboveiligheid gaat het om de veiligheid van de mensen die zich bevinden binnen de contouren van het bedrijfsterrein. Bij omgevingsveiligheid (ook wel bekend als externe veiligheid) gaat het om het beheersen van de risico's voor de (publieke) omgeving.

Omgevingsveiligheid houdt zich bezig met het maatschappelijk vraagstuk hoe risicovolle activiteiten met gevaarlijke stoffen veilig

ingepast kunnen worden in de beperkt beschikbare leefruimte. Het gaat daarbij om de nadelige gevolgen van mogelijke majeure ongevallen bij de opslag, de productie, het gebruik en het vervoer van gevaarlijke stoffen. Ongevallen die niet leiden tot effecten in de publieke ruimte zijn daarbij minder van belang. Het omgevingsveiligheidsbeleid is ook risico gebaseerd. Dat wil zeggen dat niet alleen het effect van een ongevalsscenario wordt beschouwd, maar ook de kans van optreden van het ongevalsscenario. Het totaal van de risico's van de individuele scenario's bepaalt vervolgens het omgevingsrisico. Met de invoering van de omgevingswet komt er daarbij meer aandacht voor de bescherming van de mensen in de omgeving tegen de mogelijke effecten van een ongeval.

#### 2.4.1 *Kwantitatieve risicoanalyse (QRA)*

Om de veiligheidsrisico's voor de omgeving inzichtelijk te maken en te toetsen aan de wettelijke eisen wordt in Nederland gebruik gemaakt van *kwantitatieve risicoanalyse* (hierna QRA ofwel quantitative risk assessment). De resultaten van een QRA zijn de berekende plaatsgebonden risico's, uitgedrukt in de kans per jaar op overlijden en het groepsrisico binnen het van belang zijnde effectgebied. Door deze berekende waarden te toetsen aan de geldende (risico)normen kan het bevoegd gezag een beslissing nemen over de aanvaardbaarheid van risico's in relatie tot ontwikkelingen bij een bedrijf of transportroute, of in de omgeving daarvan.

In een QRA worden voor installaties die relevant zijn voor de omgevingsveiligheid ongevalsscenario's uitgewerkt. Hierbij gaat het zowel om de kansen van optreden van het beschouwde ongevalsscenario alsook om de effecten daarvan, zoals van brand (uitgedrukt in warmtestraling), van explosie (uitgedrukt in overdruk) of van een giftige wolk (uitgedrukt in concentratie van de giftige stof). Daarbij wordt rekening gehouden met de aanwezige maatregelen die de kans op het scenario kunnen verkleinen of die de effecten ervan kunnen beperken. Voor de berekening van de risicoresultaten worden vervolgens de effecten vertaald naar een kans op overlijden waarbij nog gebruik wordt gemaakt van o.a. weerdata, ontstekingsbronnen en populatie in de omgeving.

#### 2.4.2 *Stand der techniek en best beschikbare techniek (BBT)*

Een belangrijk algemeen uitgangspunt in het omgevingsveiligheidsbeleid (als onderdeel van het bredere milieubeleid) is dat de *stand van de techniek* wordt toegepast. In de praktijk staat het begrip stand van de techniek gelijk aan het begrip Best Beschikbare Techniek (BBT). Bedrijven moeten BBT toepassen en BBT hoeft daarom niet door de overheid te worden gestimuleerd.

Anders dan bij andere milieuaspecten wordt bij omgevingsveiligheid beperkt gereguleerd op toepassing van specifieke BBT. In de Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen (PGS) zijn wel voor een aantal specifieke risicovolle activiteiten documenten opgesteld, waarin doelen en maatregelen zijn geformuleerd om de risico's te beheersen. Er is geen overzicht van procesintensificatie of inherent veiligere technieken die te beschouwen zijn als BBT of die in regelgeving expliciet worden voorgeschreven.

### 2.4.3 *Continue verbetering*

Het Besluit risico's zware ongevallen 2015 (Brzo 2015) is de Nederlandse implementatie van de Europese Seveso III-richtlijn. Het Brzo 2015 verplicht een exploitant om een risicopreventiebeleid te voeren waarin de beheersing van zware ongevallen continu wordt verbeterd. Inherent veiliger en procesintensificatie staan hoog in de hiërarchie van veiligheidsmaatregelen en kunnen bijdragen aan deze continue verbetering.

## 2.5 **Algemene beschrijving van de invloed op omgevingsveiligheid**

Deze paragraaf beschrijft hoe procesintensificatie van invloed kan zijn op omgevingsveiligheid. De invloed van specifieke procesintensificatietechnologieën wordt vervolgens beschouwd in hoofdstuk 3.

### 2.5.1 *Impact op de effecten*

Procesintensificatie kan de gevaarseffecten op de omgeving als gevolg van falen van de installatie beperken door het verminderen van de hoeveelheid van de gevaarlijke stof die potentieel kan vrijkomen, het beperken van de energie-inhoud van het reactieproces of het reduceren van de escalatiemogelijkheden (zoals een runaway-reactie).

### 2.5.2 *Impact op de kans van optreden*

Factoren die de kans op het plaatsvinden van een ongevalscenario positief kunnen beïnvloeden zijn bijvoorbeeld een hogere graad van beheersing van het reactieproces, een grotere robuustheid van de installatie of installatieonderdelen of een minder complex ontwerp door het samenvoegen van verschillende processtappen of installatieonderdelen.

### 2.5.3 *Procesintensificatie in relatie tot andere risicorelevante activiteiten*

Procesintensificatie-principes worden vooral toegepast op (combinaties van) (fysische) procesvaten, (chemische) reactorvaten en warmtewisselaars, terwijl voor de omgevingsveiligheid ook de risicobijdragen van andere installatieonderdelen zoals opslagtanks, verladingsystemen en bovengrondse transportleidingen van belang zijn. Dat betekent dat een procesintensificatietechniek weliswaar kan leiden tot een substantiële verlaging van het risico van één of enkele onderdelen, maar dat dit nog niet hoeft te leiden tot een merkbare positieve impact op de omgevingsveiligheid van een gehele inrichting.

Anderzijds kan de positieve invloed van de procesintensificatietechnologie ook verder reiken dan de omgeving van de toepassingslocatie. Ook in de keten van productie, opslag, overslag en transport van de gevaarlijke stof(fen) kunnen de omgevingsveiligheidsrisico's indirect worden gereduceerd. Bijvoorbeeld doordat de toepassing van de procesintensificatietechnologie het transport of de tussenopslag van gevaarlijke stoffen kan beperken of zelfs overbodig maakt. Ook kan toepassing van een procesintensificatietechnologie de mogelijkheid scheppen om een grootschalige centrale productie te vervangen door meerdere kleinschalige productie-eenheden op of nabij de locaties waar het product verder kan worden verwerkt of gebruikt. Deze kleinschalige procesintensificatietoepassingen zijn qua

omgevingsveiligheid doorgaans eenvoudiger in de beschikbare leefruimte in te passen.

#### 2.5.4 *Afweging van de voor- en nadelen*

Kleinere, compactere en meer efficiënte processen verlagen de hoeveelheid gevaarlijke stof die kan vrijkomen en daarmee de effecten bij een incident maar kunnen anderzijds ook nieuwe of grotere risico's introduceren. Het combineren van meerdere unit-operaties in één installatie reduceert het aantal installaties dat kan falen. Anderzijds kan een toename in complexiteit van de installatie de kans op falen doen toenemen. Het is belangrijk dat naast de mogelijke voordelen ook de mogelijke nadelen van procesintensificatie worden afgewogen. Ter illustratie worden in deze paragraaf daarom, naast een aantal potentiële voordelen, ook een aantal potentiële nadelen voor de veiligheid benoemd.

Potentiële risicoverlagende aspecten van procesintensificatie zijn [12]:

- vermindering van hoeveelheid gevaarlijke stoffen en bijbehorende effectafstanden;
- vermindering in het aantal processtappen, resulterend in minder leidingwerk tussen de processtappen en dus minder lekken;
- insluiten van overdrukken in kleinere sterkere vaten, zodat passieve en actieve maatregelen (bijvoorbeeld breekplaten) wellicht niet nodig zijn;
- minder variatie in (en makkelijker te controleren van) warmteontwikkeling dan in batch reactoren bij exotherme reacties;
- makkelijker om de benodigde warmteoverdracht te behalen vanwege het toegenomen specifieke oppervlak van een continue geïntensifieerde reactor, waarmee de kans op runaway-reacties wordt gereduceerd.

Potentiële risicoverhogende aspecten gerelateerd aan procesintensificatie zijn [12]:

- hogere eisen aan apparatuur als gevolg van hoge temperaturen, drukken en/of energietoevoer;
- verhoogde kans op falen van apparatuur of operatorfouten door toename van de procescomplexiteit en daarmee gepaard gaande complexiteit van procesbeheersingssystemen.
- hogere eisen aan processturing en monitoring als gevolg van korte verblijftijden.
- toename van de vrijkomende energie of de snelheid waarmee energie vrijkomt onder invloed van hogere reactiesnelheden door verbeterde menging;
- introduceren van een nieuwe ontstekingsbron bij combineren van bijvoorbeeld roterende apparatuur en wrijvingsgevoelige materialen;
- oververhitting van thermisch onstabiele materialen op complexe verwarmde oppervlakken die aan vervuiling onderhevig zijn;
- hoge doorzet kan leiden tot snelle opeenhoping van off-spec product verderop in het proces.

### 3 Potentie van individuele procesintensificatie-technologieën

Dit hoofdstuk beschrijft de methode en resultaten van een kwalitatieve beoordeling van de potentiële impact van individuele procesintensificatie-technologieën op omgevingsveiligheid. De uitgewerkte beoordeling per procesintensificatie-technologie is opgenomen in Bijlage 1. Uit de beoordeling volgt dat van de 69 technologieën er veertien (zeer) kansrijk worden geacht om omgevingsrisico's te reduceren. Beleidsmatige acties of vervolgonderzoek kunnen afgestemd worden op deze kansrijke technologieën.

#### 3.1 Identificatie van procesintensificatie-technologieën

Als basis voor de beoordeling is een overzicht van procesintensificatie-technologieën gebruikt dat in het SenterNovem-rapport European Roadmap for Process Intensification [1] is gepubliceerd. Voor dit rapport zijn met behulp van internationaal erkende experts de 'state-of-the-art' technologieën geïdentificeerd en beschreven. Voor de beoordeling is gebruik gemaakt van de beschrijving van alle 69 technologieën zoals opgenomen in Bijlage 1 van het SenterNovem-rapport en van de uitgebreidere 'technology reports' [13] die voor 54 van deze technologieën beschikbaar zijn.

#### 3.2 Beoordelingsmethode

Om onderscheid te kunnen maken tussen procesintensificatie-technologieën waarvan meer of minder invloed op omgevingsveiligheid mag worden verwacht, worden deze ingedeeld in een beoordelingsmatrix zoals weergegeven in Figuur 2. Daarin wordt een kwalitatieve beoordeling van de positieve invloed op omgevingsveiligheid gecombineerd met een inschatting van de marktrijpheid. Hoe deze twee dimensies worden beoordeeld wordt hieronder verder toegelicht.

|                |             | Positieve invloed op omgevingsveiligheid |                  |                  |             |
|----------------|-------------|--|------------------|------------------|-------------|
|                |             | Hoog                                     | Midden           | Laag             | Niet bekend |
| Markt-rijpheid | Hoog        | Ze <span>er</span> kansrijk              | Kansrijk         | Beperkt kansrijk | Onderzoeken |
|                | Midden      | Kansrijk                                 | Beperkt kansrijk | Matig kansrijk   | Niet bekend |
|                | Laag        | Beperkt kansrijk                         | Matig kansrijk   | Niet kansrijk    | Niet bekend |
|                | Niet bekend | Onderzoeken                              | Niet bekend      | Niet bekend      | Niet bekend |

Figuur 2 Beoordelingsmatrix om het potentieel van individuele procesintensificatie-technologieën voor omgevingsveiligheid te onderscheiden.

##### 3.2.1 Positieve invloed op omgevingsveiligheid

De potentiële positieve invloed van de procesintensificatie-technologieën op omgevingsveiligheid wordt ingeschat op basis van de principiële werking. Daarbij wordt ervan uitgegaan dat de essentiële veiligheidsvoorzieningen van de procesintensificatie-technologie

minimaal op hetzelfde niveau zijn als die van de traditionele technologie. Bij de beoordeling is geen rekening gehouden met het specifieke chemische proces waar het wordt toegepast. Ook worden de mogelijkheden die de procesintensificatie-technologie eventueel biedt om een specifiek proces via een andere chemische reactieroute uit te voeren, bijvoorbeeld door vervanging van de gevaarlijke stoffen door minder gevaarlijke, niet meegenomen.

Opsommend worden onderstaande aspecten die van belang kunnen zijn voor de omgevingsveiligheid, niet meegenomen in de beoordeling:

- Of een procesintensificatie-technologie daadwerkelijk kan worden toegepast bij specifieke risicorelevante processen is niet beschouwd.
- Operationele aspecten die de kans op falen kunnen beïnvloeden, zoals warmteontwikkeling en –overdracht, processturing, vervuiling en verstopping, zijn niet meegenomen in de waardering maar waar mogelijk wel benoemd als aandachtspunt.
- De eventuele vervanging van grond- en hulpstoffen door stoffen met andere gevaarseigenschappen is niet beoordeeld.
- Ten slotte zijn ook de risico's die een procesintensificatie-technologie kan creëren of wegnemen op een andere plek in de keten van een productielijn niet specifiek beschouwd.

De invloed op omgevingsveiligheid wordt kwalitatief beoordeeld als hoog, midden of laag. Daarvoor wordt een procesintensificatie-technologie op vier verschillende aspecten gewaardeerd. Een positieve waardering op ten minste drie van de vier aspecten resulteert in de beoordeling 'Hoog'. Een positieve waardering voor twee van de vier aspecten resulteert in 'Midden' en in de andere gevallen resteert de kwalificatie 'Laag'. De vier beoordelingsaspecten zijn:

1. *Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant / Beperkt)*  
 Procesintensificatie kan de gevaarseffecten op de omgeving beperken door het verminderen van de hoeveelheid van de gevaarlijke stof die kan vrijkomen. Zoals eerder toegelicht in paragraaf 2.5.3 moet een procesintensificatie-techniek leiden tot een aanzienlijke verlaging van het risico van een individuele installatie, voordat dit leidt tot een positieve impact op de omgevingsveiligheid van een gehele inrichting. In dat licht wordt gesteld dat de procesintensificatie-technologie moet resulteren in ten minste één orde groter reductie van de hoeveelheid gevaarlijke stof ten opzichte van de conventionele technologie, wil er een reële kans zijn op positieve impact op de omgevingsveiligheid. In dat geval wordt dit aspect beoordeeld als 'significant' en anders als 'beperkt'.
2. *Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja / Nee)*  
 Een verminderde energie-inhoud door lagere druk en/of temperatuur kan de letale effectafstanden bij ongewenst vrijkomen van de gevaarlijke stof reduceren. Met 'Ja' of 'Nee' of wordt beoordeeld of de procesintensificatie-technologie resulteert in lagere druk en/of temperatuur ten opzichte van de conventionele technologie.
3. *Vermindering van het aantal processtappen*

Wanneer met de procesintensificatie-technologie meerdere processtappen (unit-operaties) kunnen worden gecombineerd in één installatie(onderdeel) dan reduceert dat het aantal insluitsystemen dat kan falen. Dit aspect wordt beoordeeld met 'Ja' of 'Nee'.

4. *Mogelijkheid tot schaalverkleining voor modulaire of decentrale toepassing*

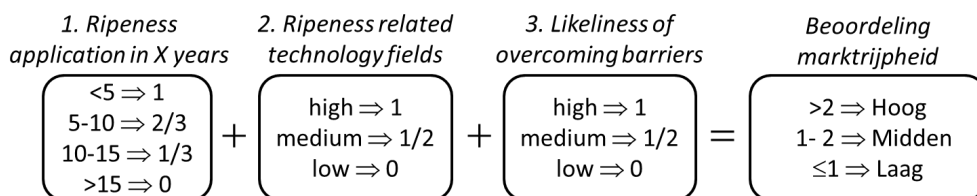
Wanneer een procesintensificatie-technologie modulair schaalbaar<sup>3</sup> is dan kan de hoeveelheid gevaarlijke stof die kan vrijkomen verminderd worden door één installatie(onderdeel) te vervangen door kleinere parallele installaties. Daarnaast kan een conventionele grootschalige centrale productie vervangen worden door kleinschalige productie van gevaarlijke stoffen direct bij de afnemers, waarmee naast inherent veiliger ontwerp ook transportrisico's tussen producent en afnemers worden vermeden. Dit aspect wordt beoordeeld met 'Ja' of 'Nee'.

### 3.2.2 *Beoordeling marktrijpheid*

De beoordeling van de marktrijpheid is gebaseerd op de beoordeling zoals opgenomen in bijlage 1 van het eerder vermelde SenterNovem-rapport [1]. Daarin zijn drie aspecten van marktrijpheid beschreven, namelijk:

1. *Ripeness application in X years (<5 / 5-10 / 10-15 / >15)*
2. *Ripeness related technology fields (high / medium / low)*
3. *Likelihood of overcoming barriers (high / medium / low)*

Deze drie aspecten van marktrijpheid worden vertaald naar één uiteindelijke beoordeling van de marktrijpheid volgens de methode zoals weergegeven in Figuur 3.



Figuur 3 Beoordeling van marktrijpheid door normalisatie en optellen van de drie beoordeelde aspecten.

## 3.3 Resultaten

De uitgewerkte beoordeling per procesintensificatie-technologie is opgenomen in Bijlage 1. Het beoordelingsresultaat van al deze technologieën is samengevat in Figuur 4. Van de 69 beoordeelde procesintensificatie-technologieën zijn er tien die beoordeeld zijn als kansrijk of zeer kansrijk om de veiligheidsrisico's voor de omgeving substantieel te reduceren. Van vier technologieën is de positieve impact op omgevingsveiligheid als hoog beoordeeld, maar is de marktrijpheid op dit moment onbekend en dient nader onderzocht te worden.

<sup>3</sup> Met modulair schaalbaar wordt hier bedoeld dat een installatie zodanig is ontworpen dat de werking van de installatie niet nadelig wordt beïnvloed wanneer deze kleiner wordt uitgevoerd.

|               |             | Positieve impact op omgevingsveiligheid |                       |                        |                  |
|---------------|-------------|---|-----------------------|------------------------|------------------|
|               |             | Hoog                                    | Midden                | Laag                   | Niet bekend      |
| Marktrijpheid | Hoog        | 1<br>Zeer kansrijk                      | 8<br>Kansrijk         | 15<br>Beperkt kansrijk | -<br>Onderzoeken |
|               | Midden      | 1<br>Kansrijk                           | 5<br>Beperkt kansrijk | 8<br>Matig kansrijk    | -<br>Niet bekend |
|               | Laag        | 1<br>Beperkt kansrijk                   | 2<br>Matig kansrijk   | 5<br>Niet kansrijk     | -<br>Niet bekend |
|               | Niet bekend | 4<br>Onderzoeken                        | 2<br>Niet bekend      | 14<br>Niet bekend      | 3<br>Niet bekend |

Figuur 4 Resultaat van beoordelingen opgenomen als aantallen in de beoordelingsmatrix.

In Tabel 1 zijn de tien voor de omgevingsveiligheid (zeer) kansrijke en vier nader te onderzoeken procesintensificatie-technologieën weergegeven. Om de voordelen van procesintensificatie voor omgevingsveiligheid effectief te benutten wordt aanbevolen om beleidsmatige acties of vervolgonderzoek primair te richten op deze veertien kansrijke technologieën.

Tabel 1 Geselecteerde voor omgevingsveiligheid kansrijke procesintensificatie-technologieën.

| Ref. nr. bijlage 1 | procesintensificatie technologie           | Impact omgevingsveiligheid | Marktrijpheid | Beoordelingsresultaat |
|--------------------|--|----------------------------|---------------|-----------------------|
| 1.2.1.1            | Heterogeen catalyst foam reactors          | Midden                     | Hoog          | Kansrijk              |
| 1.2.1.2            | Monolithic reactors                        | Midden                     | Hoog          | Kansrijk              |
| 1.2.2              | Micro channel reactors (incl. micromixers) | Hoog                       | N.b.          | Onderzoeken           |
| 1.2.4              | Static mixer reactors                      | Midden                     | Hoog          | Kansrijk              |
| 2.1.5.4            | Membrane Distillation                      | Hoog                       | Midden        | Kansrijk              |
| 2.1.5.6            | Membrane extraction                        | Hoog                       | N.b.          | Onderzoeken           |
| 2.2.1              | HEX Reactors                               | Hoog                       | Hoog          | Zeer kansrijk         |
| 2.2.2              | Membrane reactors (selective, catalytic)   | Hoog                       | N.b.          | Onderzoeken           |
| 2.2.8.2            | Membrane-assisted reactive distillation    | Midden                     | Hoog          | Kansrijk              |
| 3.1.2              | Centrifugal liquid-liquid contactors       | Midden                     | Hoog          | Kansrijk              |
| 3.1.5              | Spinning disc reactor                      | Hoog                       | N.b.          | Onderzoeken           |
| 3.2.8.1            | Supersonic Gas-Liquid Reactors             | Midden                     | Hoog          | Kansrijk              |
| 3.3.1.1            | Extraction & dispersion                    | Midden                     | Hoog          | Kansrijk              |
| 4.1.1              | Oscillatory baffle reactors and COBR's     | Midden                     | Hoog          | Kansrijk              |

N.b. = Niet bekend



## 4 Kwantitatieve beoordeling van een praktijkcasus

In de oorspronkelijke projectaanpak is voorzien in een kwantitatieve beoordeling van de veiligheidsimpact van een specifieke procesintensificatie-technologie aan de hand van een praktijkcasus. Daarvoor dient voor de situatie samen met een bedrijf een kwantitatieve risicoanalyse (QRA) te worden uitgevoerd, die specifiek is voor de situatie waar de procesintensificatie-technologie wordt toegepast.

Dit onderdeel van het project is niet uitgevoerd, omdat er geen bedrijf is gevonden waarmee een procesintensificatie-technologie kon worden geëvalueerd binnen de scope van dit onderzoek.

Wanneer een combinatie van bedrijf en kansrijke procesintensificatie-technologie zou zijn gevonden, dan kan met het uitvoeren van een QRA op dit moment vooral inzicht gegeven worden in eventueel gewijzigde effecten.

Het kwantificeren van verwachte gewijzigde faalkansen is lastiger. Met veel nieuwe procesintensificatie-technologieën is nog weinig praktijkervaring op grote schaal opgedaan en voor zover bekend zijn nog geen veiligheidsstudies uitgevoerd naar de faalmechanismen. Wanneer de specifieke faalkansen van de procesintensificatie-technologie niet bepaald zijn, zal bij een kwantitatieve risicoanalyse moeten worden uitgegaan van de generieke faalcijfers zoals die nu gebruikt worden voor de huidige installaties. De uitkomst van de risicoanalyse geeft dan beperkt inzicht in het werkelijke omgevingsrisico van een procesintensificatie-technologie. Om meer specifieke faalkansen te kunnen bepalen is nader onderzoek nodig naar de faalmechanismen van een procesintensificatie-technologie en een expertbeoordeling van de kans op falen, omdat incidentencasuïstiek onvoldoende beschikbaar is.



## 5 Conclusies en aanbevelingen

Procesintensificatie is een manier om industriële processen met gevaarlijke stoffen aan de voorkant inherent veiliger te maken. Met procesintensificatie kan invulling worden gegeven aan de wettelijke eis om de beheersing van de risico's op zware ongevallen continu te verbeteren.

Procesintensificatie heeft potentie om de omgevingsveiligheid te verbeteren. Bepaalde procesintensificatie-technologieën hebben bij falen minder effect op de omgeving in vergelijking tot de conventionele optie. Ook kan door vereenvoudiging van het installatie- of procesontwerp of door samenvoeging van processen de kans van optreden van een ongevalsscenario worden verkleind. Daarnaast kan procesintensificatie leiden tot minder transport van een gevaarlijke stof. Het is wel belangrijk dat naast de potentiële veiligheidsvoordelen ook de mogelijke veiligheidsnadelen van procesintensificatie worden herkend en meegewogen.

Uit de kwalitatieve beoordeling van 69 verschillende procesintensificatie-technologieën volgt dat er 14 kansrijk worden geacht om omgevingsrisico's te reduceren. Een meer kwantitatieve beoordeling is alleen mogelijk op basis van een concrete praktijkcasus.

De resultaten van dit onderzoek kunnen gebruikt worden voor de onderbouwing van verdere beleidsvorming op het onderwerp procesintensificatie. Bij voorkeur wordt procesintensificatie daarbij in samenhang met inherente veiligheid gezien. Daarbij kan gedacht worden aan:

- Het ondersteunen van veiligheidsstudies, die verder inzicht geven in de invloed van kansrijke procesintensificatie-technologieën op de omgevingsveiligheid.
- Het stimuleren van de toepassing van procesintensificatie in situaties waar de huidige omgevingsrisico's zodanig zijn dat vermindering daarvan prioriteit heeft.
- Bedrijven en bevoegd gezagen wijzen op procesintensificatie als een mogelijkheid om invulling te geven aan de wettelijke verplichting om de beheersing van zware ongevallen continu te verbeteren.



## 6 Referenties

- [1] SenterNovem, 2007, European Roadmap for Process Intensification, <https://www.rvo.nl/onderwerpen/duurzaam-ondernemen/energie-besparen/chemiewijzer/processen/procesintensificatie/roadmap/actionplan>
- [2] Stankiewicz, Moulijn, 2004, Re-engineering the chemical processing plant, process intensification, ISBN: 0-8247-4302-4
- [3] Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO), 2017, MIA/Vamil, Brochure en Milieulijst 2017, <http://www.rvo.nl/subsidies-regelingen/mia-en-vamil>
- [4] Kennishouders waarmee gedurende het onderzoek contact mee is geweest: (1) Andrzej Stankiewicz, hoogleraar Intensified Reaction & Separation Systems, TU Delft; (2) Jaap Schouten, hoogleraar Chemische Reactor Technologie, TU Eindhoven; (3) Christian Zomer, MIA/VAMIL adviseur, RVO; (4) Melle Nieuwhof, cluster director procesintensificatie, Institute for Sustainable Process Technology, (5) Henk Akse, voorzitter Dutch Process Intensification Network (PIN-NL), Traxxys; (6) Jeoffrey van den Bergh, Flowid BV; (7) Marit van Lieshout, Lector procesoptimalisatie en -intensificatie, Kenniscentrum Duurzame Havenstad, Hogeschool Rotterdam.
- [5] SenterNovem, 2007, Action Plan Process Intensification, [http://www.rvo.nl/sites/default/files/bijlagen/Action\\_Plan\\_Process\\_Intensification.pdf](http://www.rvo.nl/sites/default/files/bijlagen/Action_Plan_Process_Intensification.pdf)
- [6] Traxxys, 2012, Input voor routekaart VNCI, <http://www.routekaartchemie.nl/images/2012-11/procesintensificatie.pdf>
- [7] Kletz, T.A., 1978, 'What you don't have can't leak', Chem Ind 1978; May 6, 287-292
- [8] Kletz, T.A., Amyotte, P., 2010, Process plants, a Handbook for Inherently Safer Design, second edition, ISBN-10: 1439804559
- [9] Amyotte, P., Khan F., Kletz, T.A., 2009, 'Inherently safer design activities over the past decade', IChemE, Hazards XXI, Symposium Series No. 155, 2009
- [10] Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid, Arboportaal > Onderwerpen > Arbeidshygiënische strategie, <https://www.arboportaal.nl/onderwerpen/arbeidshygiënische-strategie>
- [11] Khoshabi, P. and Sharratt, P.N., 2007, Inherent safety through intensive structured processing: the IMPULSE project, IChemE Symposium Series No. 153, in 12th International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries (Edinburgh, UK)
- [12] Etchells, J., 2005, 'Process intensification. Safety pros and cons', Process Safety and Environmental Protection, 83(B2): 85-89.
- [13] SenterNovem, 2007, European Roadmap for Process Intensification – Technology report, <https://traxxys.com/expert-reports-about-intensified-technologies/>



## Bijlage 1 Kwalitatieve beoordeling van de invloed op de omgevingsveiligheid per procesintensificatie-technologie

In 2007 heeft SenterNovem het rapport *European Roadmap for Process Intensification* [1] gepubliceerd. Dit rapport identificeert de potentiële voordelen van procesintensificatie en komt met aanbevelingen om de toepassing van procesintensificatie in de procesindustrie te versnellen. Het rapport identificeert 69 verschillende procesintensificatie-technologieën waarvan er 46 kwalitatief zijn beoordeeld op verschillende elementen zoals de marktrijpheid van de technologie.

De beoordelingen in deze bijlage geven eerst een korte omschrijving van de technologie, dan een beschouwing van de relevante aspecten voor de omgevingsveiligheid en vervolgens een evaluatie van de potentie voor impact op omgevingsveiligheid en de marktrijpheid die volgt uit het SenterNovem rapport. Een toelichting op deze beoordelingsmethode is opgenomen in paragraaf 3.2 van de hoofdtekst. De nummering in deze bijlage is hetzelfde als in het SenterNovem-rapport.

### 1. Structured devices

#### 1.1 Non-reactive

#### 1.1.1 Advanced plate-type heat exchangers

##### *Omschrijving*

Warmtewisselaar waarbij de uitwisselende stromen van elkaar gescheiden worden door verschillende mogelijke plaatconfiguraties zoals: plate-fin, plate-and-shell, falt tube-and-fin, spiral, micro-channel, multistream.

##### *Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid*

- Hogere ratio van warmtewisselend oppervlak ten opzichte van volume leidt tot compactere warmtewisselaar die typisch tot één orde grootte kleiner is dan een conventionele shell-and-tube warmtewisselaar. Nalevering (debiet maal reactietijd insluitsysteem) is echter in de meeste gevallen bepalend voor totale uitstroomhoeveelheid gevaarlijk stof.
- Kleinere hydraulische diameter (vervuiling en verstopping) en complexere constructie in het algemeen zijn in potentie faalkans-verhogend.

| <b>Evaluatie</b>   |         |
|--|---------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Laag    |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Beperkt |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Nee     |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Nee     |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Ja      |
| 2. Marktrijpheid   | Hoog    |

### 1.1.2 Advanced shell-and-tube heat exchangers

#### *Omschrijving*

Innovatieve toevoegingen of wijzigingen in een conventionele shell-and-tube warmtewisselaar zoals bijvoorbeeld Helixchanger®, rod baffle, EM baffle, low-fin tube, twisted tube, tube insert of static mixers-heat exchangers.

#### *Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid*

Innovatieve toevoegingen of wijzigingen om de prestatie van een conventionele warmtewisselaar te verbeteren (bijvoorbeeld hogere warmteoverdracht, lagere drukval, minder trillingen of minder vervuiling) kunnen leiden tot beperkte vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen en in potentie ook een reductie van de faalkans.

| <b>Evaluatie</b>   |         |
|--|---------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Laag    |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Beperkt |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Nee     |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Nee     |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Nee     |
| 2. Marktrijpheid   | Hoog    |

### 1.1.3 Structured internals for mass transfer

#### *Omschrijving*

Gestructureerde pakkingen voor een verhoging van massaoverdracht bij destillatie, absorptie en extractie.

#### *Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid*

Vervanging van niet gestructureerde door gestructureerde pakkingen om menging en massaoverdracht te verbeteren kan leiden tot beperkte vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie.

| <b>Evaluatie</b>   |             |
|--|-------------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Laag        |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Beperkt     |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Nee         |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Nee         |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Nee         |
| 2. Marktrijpheid   | Niet bekend |



### 1.1.4 Static mixers (zie ook paragraaf 1.2.1.4 en 1.2.4)

#### Omschrijving

Toevoeging van een inwendige structuur aan een pijp om effectieve menging in continue doorstroming te bewerkstelligen. Massaoverdracht kan factor 10-100 hoger zijn dan een conventionele geroerde tankmenger.

#### Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid

- Significant compactere mixer resulteert in geringere initiële uitstroom van gevaarlijke stof bij falen van het omhulsel.
- Afwezigheid van bewegende onderdelen en afdichtingen vereist minder onderhoud en reduceert in potentie de kans op falen.
- Afhankelijk van het toepassingsgebied is er in potentie een verhoogde kans op verstopping en als gevolg daarvan falen door overdruk.

| Evaluatie  |             |
|--|-------------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Midden      |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Significant |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Nee         |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Nee         |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Ja          |
| 2. Marktrijpheid   | Midden      |

### 1.2.1 Structured catalyst-based reactors

#### 1.2.1.1 Heterogen catalytic foam reactors

#### Omschrijving

Katalysator op een niet-flexibele schuimstructuur heeft, ten opzichte van een conventionele fixed bed reactor gevuld met katalysatordeeltjes, in potentie een lagere drukval en verbeterde warmteafvoer. Een nadeel is dat de katalysatoroppervlaktedichtheid relatief laag is.

#### Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid

- Lagere katalysatoroppervlaktedichtheid ten opzichte van een conventionele random packed bed reactor resulteert in groter reactorvolume en grotere initiële uitstroming van gevaarlijke stof bij falen van de reactor.
- Verbeterde warmteafvoer vermindert de kans op hotspots en runaway-reacties en lagere drukval vermindert de kans op verstopping en reduceert daarmee in potentie de kans op falen.

| <b>Evaluatie</b>   |          |
|--|----------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Midden   |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Beperkt* |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Ja       |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Nee      |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Ja       |
| 2. Marktrijpheid   | Hoog     |

\*De hoeveelheid gevaarlijke stof in de installatie kan zelfs toenemen.

### 1.2.1.2 Monolithic reactors

#### *Omschrijving*

Blokken van keramiek of gegolfd metaal uit één stuk die bestaan uit een veelheid aan nauwe parallelle kanalen, waarbij de wanden worden bedekt met 'waslaag' waarin katalysator-nanodeeltjes zijn verwerkt. De voordelen, ten opzichte van een conventionele random packed bed reactor gevuld met katalysatordeeltjes, zijn lagere drukval, nauwere verdeling van verblijftijd (en verbeterde selectiviteit) en hogere katalysatoroppervlaktedichtheid.

#### *Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid*

- Hogere oppervlaktedichtheid resulteert in beperkt kleiner reactorvolume en kleinere initiële uitstroming van gevaarlijke stof bij falen van de reactor.
- Rechte kanalen vermindert de kans op verstoppingen en reduceert daarmee bij toepassingen met vaste stofdeeltjes in potentie ook de kans op falen.
- Verminderde wamteafvoer verhoogt de kans op hotspots en runaway bij exotherme reactie en verhoogt daarmee in potentie de kans op falen.

| <b>Evaluatie</b>   |         |
|--|---------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Midden  |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Beperkt |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Ja      |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Nee     |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Ja      |
| 2. Marktrijpheid   | Hoog    |

### 1.2.1.3 Millisecond (gauze) reactors

#### *Omschrijving*

Katalysator opgebouwd uit (een opeenstapeling van) fijngeweven (edel)metaal. Milliseconde (gauze) reactoren zijn thermisch zeer stabiel (temperatuur tot 1500 °C en grote temperatuurgradiënten mogelijk zonder deactivatie of beschadiging) en kunnen daarmee toegepast worden voor partiële oxidatiereacties.

*Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid*

- Hogere reactiesnelheid bij hogere temperatuur resulteert in significant kleiner reactorvolume (ten opzichte van conventionele partiële oxidatiereactor) en kleinere initiële uitstroming van gevaarlijke stof bij falen van de reactor.
- Vrijwel adiabatische operatieregime al mogelijk bij kleine reactorvolumes waardoor het ook geschikt is voor kleinschalige lokale toepassingen.
- Afhankelijk van het toepassingsgebied is er een verhoogde kans op verstopping en falen door overdruk.

| <b>Evaluatie</b>   |             |
|--|-------------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Midden      |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Significant |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Nee         |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Nee         |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Ja          |
| 2. Marktrijpheid   | Midden      |

#### **1.2.1.4 Arrays of Structural Elements (ASE) en Arrays of Conventional Catalyst Particles (ACCP)**

*Omschrijving*

ASE is vergelijkbaar met monolith maar met meng/interconnectie-passages. ACCP bestaat uit katalysatordeeltjes die met behulp van gestructureerde internals zijn geordend in de reactor. De voordelen, ten opzichte van een conventionele fixed-bedreactor gevuld met katalysator deeltjes, zijn lagere drukval, nauwere verdeling van verblijftijd (en verbeterde selectiviteit van ~10%). Intensieve menging zorgt voor effectieve warmteafvoer.

*Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid*

- Verbeterde warmteafvoer vermindert de kans op hotspots en runaway-reacties en reduceert daarmee in potentie de kans op falen.
- Hogere oppervlakedichtheid bij ASE resulteert in beperkt kleiner reactorvolume en kleinere initiële uitstroming van gevaarlijke stof bij falen van de reactor.
- Verbetering van selectiviteit maar niet van oppervlakedichtheid bij ACCP resulteert in beperkte vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie.

| <b>Evaluatie</b>   |         |
|--|---------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Midden  |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Beperkt |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Ja      |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Nee     |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Ja      |
| 2. Marktriptheid   | Midden  |

### 1.2.2 Micro channel reactors (including micromixers)

#### *Omschrijving*

Chemische reactoren met extreem kleine afmetingen, vaak op basis van een sandwich structuur met microkanalen. Hoog oppervlakte/reactievolumeratio zorgt voor zeer hoge warmteoverdracht en uitstekende controle over de reactietemperatuur. Nadelen zijn hoge drukval en kans op verstopping.

#### *Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid*

- Verbeterde warmteafvoer vermindert de kans op hotspots en runaway-reacties en reduceert daarmee de kans op falen.
- Hogere reactiesnelheid resulteert in significant kleiner reactorvolume en kleinere initiële uitstroming van gevaarlijke stof bij falen van de reactor.
- Reactie bij omgevingstemperatuur in plaats van cryogene condities zorgt ervoor dat extra koelapparatuur niet noodzakelijk is.
- Verbeterde productselectiviteit kan ervoor zorgen dat nageschakelde scheidingsstap niet meer nodig is.
- Afhankelijk van het toepassingsgebied is er een verhoogde kans op verstopping en falen door overdruk.

| <b>Evaluatie</b>   |             |
|--|-------------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Hoog        |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Significant |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Nee         |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Ja          |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Ja          |
| 2. Marktriptheid   | Niet bekend |

### 1.2.3 Membrane reactors (non-selective)

#### *Omschrijving*

Membraan dient als microstructuur voor reactie of dosering. Enerzijds kan de katalysator worden aangebracht op het membraan waardoor er een gestructureerde katalytische reactor met korte contacttijd ontstaat. Anderzijds kan een membraan toegepast worden in een packed/fluidized bed reactor om gecontroleerde dosering van één reactant over de lengte van de reactor te bewerkstelligen.

*Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid*

- Wanneer het wordt toegepast als gestructureerde reactor dan resulteert dit in een beperkt kleiner reactorvolume en kleinere initiële uitstroming van gevaarlijke stof bij falen van de reactor.
- Wanneer het wordt toegepast voor nauwkeurige dosering dan betreft het een incrementele verbetering ten opzichte van conventionele doseersystemen met beperkte verbetering van selectiviteit of yield.

| <b>Evaluatie</b>   |         |
|--|---------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Laag    |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Beperkt |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Nee     |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Nee     |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Nee     |
| 2. Marktrijpheid   | Laag    |

**1.2.4 Static mixer reactors***Omschrijving*

Intensificatie van de menging, warmte- en massaoverdracht door het toevoegen van statische mixer-elementen (zie ook 1.1.4) in een reactor.

*Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid*

- Verbeterde menging, warmte- en massaoverdracht resulteert in ordegrootten kleiner reactorvolume in vergelijking met een conventionele batchreactor.
- Hogere drukken en temperaturen zijn mogelijk in static mixer reactoren ten opzichte van batch vaten en sommige andere procesintensificatie-reactoren.
- Afhankelijk van het toepassingsgebied is er in potentie een verhoogde kans op verstopping en als gevolg daarvan falen door overdruk.

| <b>Evaluatie</b>   |             |
|--|-------------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Midden      |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Significant |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Nee         |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Nee         |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Ja          |
| 2. Marktrijpheid   | Hoog        |

**2 Hybrid****2.1 Non-reactive****2.1.1 Adsorptive distillation***Omschrijving*

Adsorptive distillation (AD) is een hybride scheidingsmethode waarbij in één procesvat het destillatieproces en een selectieve adsorptie (aan een vast adsorbent) gelijktijdig plaatsvinden. AD wordt toegepast om mengsels van vloeistoffen met kookpunten die dicht bij elkaar liggen te scheiden en daarmee het ontstaan van een azeotropisch mengsel te vermijden of om verontreinigingen in de procesvloeistof weg te halen. De AD-stap wordt gevolgd door een desorptie/destillatiestap in een aparte proceskolom.

*Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid*

- AD resulteert in een effectiever scheidingsproces in vergelijking tot de conventionele werkwijze (afzonderlijke scheidingsstappen) waardoor bij gelijke capaciteit de kolom kleiner kan worden gedimensioneerd (minder schotels per destillatiekolom) of minder destillatiekolommen nodig zijn. Dat leidt tot een geringere uitstroom bij falen.
- De bedrijfsvoering van een hybride toepassing (gelijktijdige destillatie/adsorptie c.q. destillatie/desorptie in het procesvat) is technisch complexer dan bij een conventionele (aparte) destillatiekolom of adsorptieprocesvat. Daardoor worden mogelijk extra faalmechanismen in de procesvoering geïntroduceerd. Dit geeft een grotere kans op falen.
- Ondanks dat het AD-principe al 50 jaar oud is, zijn er nog geen voorbeelden van praktische toepassingen vanwege technische problemen.

| <b>Evaluatie</b>   |         |
|--|---------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Laag    |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Beperkt |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Nee     |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Ja      |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Nee     |
| 2. Marktrijpheid   | Laag    |

### **2.1.2 Extractive crystallization**

*Omschrijving*

Extractive crystallization (EC) is een fysische scheidingsmethode waarbij een component wordt gescheiden van een productstroom door het toevoegen van een derde component (meestal een solvent). Deze extra solvent heeft de specifieke eigenschap dat het de te scheiden stof sterk bindt via kristallisatie en die stof weer eenvoudig loslaat bij een andere temperatuur.

*Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid*

- Extractive crystallization beoogt met name verminderd energieverbruik en opereert bij lagere temperatuur en/of druk ten opzichte van conventionele evaporation crystallization of gas absorptie/desorptie.

- Kristallisatie kan meer dan bij conventionele technologie leiden tot ongewenste afzettingen c.q. verstoppingen in het procesvat. Dit kan in potentie leiden tot een verhoogde faalkans.

| <b>Evaluatie</b>   |             |
|--|-------------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Laag        |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Beperkt     |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Ja          |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Nee         |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Nee         |
| 2. Marktrijpheid   | Niet bekend |

### 2.1.3 Extractive distillation

#### *Omschrijving*

Extractive distillation (ED) is de oudste en meest toegepaste hybride scheidingsmethode. Nieuw is de toepassing van hyper-branched polymers or ionic liquids in ED. ED wordt toegepast voor vloeistofmengsels waarbij de kookpunten van de componenten dicht bij elkaar liggen of waarbij een azeotropisch mengsel wordt gevormd. Door het toevoegen van een extra solvent aan het vloeistofmengsel worden de aanvankelijk kleine verschillen in vluchtigheid vergroot. Daardoor kan het mengsel beter worden gescheiden. Het extra solvent wordt later in een aparte procesinstallatie weer teruggewonnen.

#### *Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid*

- Vanwege de hybride toepassing in één destillatiekolom leidt ED tot een 25% reductie van de kapitaalkosten in vergelijking tot de conventionele werkwijze (met gescheiden procesvaten voor de extractie en de destillatie). Dat kan zowel via een kleiner gedimensioneerd procesvat/destillatiekolom of door beperking van het aantal.
- Veel entrainers die gebruikt worden bij extractive distillation zijn schadelijk voor de gezondheid en emissie hiervan dient voorkomen te worden.

| <b>Evaluatie</b>   |         |
|--|---------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Laag    |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Beperkt |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Nee     |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Ja      |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Nee     |
| 2. Marktrijpheid   | Midden  |

### 2.1.4 Heat integrated distillation

#### Omschrijving

Bij Heat integrated distillation (HID) vindt de gasfasescheiding (rectifying, hogere temperatuur) en de vloeistofscheiding (stripping, lagere temperatuur) niet boven respectievelijk onder in de kolom plaats zoals bij een conventionele destillatiekolom, maar worden deze in twee aparte delen gesplitst en naast elkaar gecombineerd in bijvoorbeeld een ringvormige opstelling. Daarbij kan de overtollige warmte van de rectifying sectie gebruikt worden voor de stripping sectie (warmte-integratie) teneinde een energie- en kapitaalkostenbesparing te realiseren zo'n 30%.

#### Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid

- Verschillende scheidingsstappen kunnen in één kolom worden geïntegreerd en het aantal warmtewisselaars wordt gereduceerd.
- In een conventionele destillatiekolom is eenzelfde druk aanwezig in zowel de rectifying als de stripping sectie. Bij een gescheiden rectifying en stripping sectie zijn de procesdrukken verschillend. Dit kan leiden tot technische knelpunten.

| Evaluatie  |         |
|--|---------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Laag    |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Beperkt |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Nee     |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Ja      |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Nee     |
| 2. Marktrijpheid   | Hoog    |

### 2.1.5 Membrane hybrid system

#### 2.1.5.1 Membrane absorption/stripping

##### Omschrijving

Het membraan bij Membrane absorption/stripping is selectief doorlaatbaar voor één bepaalde component die vervolgens wordt opgelost in ofwel gestript uit een absorptievloeistof. Het membraan zorgt ervoor dat absorptie/strippen plaats kan vinden zonder een echte gas/vloeistof interface in de vorm van bellen.

Van oorsprong is deze techniek veel toegepast bij de waterzuivering en later ook voor het reinigen van (industriële) (af)gasstromen.

#### Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid

- Membraanabsorptie kan ten opzichte van een conventionele absorptiekolom resulteren in een beperkte reductie van de grootte van de installatie. Wel zijn de membraanvezels modulair schaalbaar.
- Het membraan zal bij falen op zichzelf geen directe gevaren voor de omgeving opleveren. Indien het membraan in een procesvat is ingebouwd, zal bij falen van het membraan de uitgangssituatie (het oorspronkelijke gas/vloeistofmengsel) in het procesvat gehandhaafd blijven.



| <b>Evaluatie</b>   |             |
|--|-------------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Laag        |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Beperkt     |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Nee         |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Nee         |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Ja          |
| 2. Marktrijpheid   | Niet bekend |

### 2.1.5.2 Membrane adsorption

#### *Omschrijving*

Bij adsorptie in een membraan stromen de deeltjes door de doorvoeropeningen van het membraan en hechten zich aan het oppervlak. Waar bij conventioneel adsorptiemateriaal (chromatografie) de deeltjes eerst in de microporiën moeten diffunderen om zich te hechten, passeren de deeltjes bij MA per definitie het oppervlak bij het stromen door het membraan. Wat leidt tot een betere scheiding. Vervolgens dient het membraan geregenereerd te worden om de geadsorbeerde deeltjes af te scheiden. Tot nu toe wordt membraan-adsorptie vrijwel alleen toegepast bij de verwerking van proteïnen.

#### *Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid*

Membraan adsorptie kan ten opzichte van een conventionele chromatografie resulteren in een beperkte reductie van de grootte van de installatie.

| <b>Evaluatie</b>   |             |
|--|-------------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Laag        |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Beperkt     |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Nee         |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Nee         |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Ja          |
| 2. Marktrijpheid   | Niet bekend |

### 2.1.5.3 Membrane crystallization

#### *Omschrijving*

Het membraan wordt toegepast in een hybride destillatie/kristallisatie-proces. De vloeistof verdampst bij het membraan, diffundeert door de poriën en condenseert aan de andere zijde van het membraan. De destillatie bij het membraan kan worden uitgevoerd bij kleinere verschillen in kooktemperatuur van de aanwezige vloeistoffen in vergelijking tot een conventionele destillatiemethode.

Toepassing van membraantechnologie bij het kristallisatieproces levert ten opzichte van conventionele kristallisatie voordelen op, zoals de vorming van beter controleerbare groeikernen (nucleus) en een hoge kristallisatiesnelheid en is daarmee vooral interessant voor de

farmaceutische industrie. Ook is MC toepasbaar voor stoffen die niet met conventionele methoden kunnen kristalliseren.

*Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid*

- Membraankristallisatie kan ten opzichte van een conventioneel kristallisatievat resulteren in een beperkte reductie van de grootte van de installatie en is net als overige membraantechnologieën modulair schaalbaar.
- Toepassing van membraankristallisatie wordt vooral voorzien in de farmaceutische industrie en heeft daarmee geen directe relevantie voor omgevingsveiligheid.

| <b>Evaluatie</b>   |         |
|--|---------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Laag    |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Beperkt |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Nee     |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Nee     |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Ja      |
| 2. Marktrijpheid   | Laag    |

#### **2.1.5.4 Membrane distillation**

*Omschrijving*

Bij Membrane distillation (MD) wordt een vloeistof verdampt en de apolaire dampdeeltjes door een (hydrofoob) membraan geleid, waar ze aan de andere zijde van het membraan weer condenseren.

*Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid*

- De toepassing van membraandistillatie wordt vooral voorzien voor waterzuivering en ontzilting en heeft daarmee geen directe relevantie voor omgevingsveiligheid. De potentie voor impact op omgevingsveiligheid is daarmee per definitie laag.
- Lagere operatietemperatuur dan bij conventionele distillatie, of lagere druk dan bij conventionele door drukverschil gedreven membraanscheiding.

| <b>Evaluatie</b>   |         |
|--|---------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Laag    |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Beperkt |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Ja      |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Nee     |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Ja      |
| 2. Marktrijpheid   | Midden  |

### 2.1.5.5 Distillation - pervaporation

#### *Omschrijving*

Pervaporation (een samenvoeging van PERmeaat en eVAPORATION) is een scheidingstechniek voor mengbare vloeistoffen of gas/vloeistofmengsels gebaseerd op membraantechnologie, waarbij de vloeistof wordt verdampt (evaporated) en de damp vervolgens door het membraan wordt geleid (permeaat). Het membraan dat geschikt is voor de aanwezige stoffen, scheidt het mengsel vervolgens in een gasvormig permeaat en een vloeistof retentaat. De techniek kan los worden bedreven of worden gecombineerd met een destillatiekolom (zowel vóór als ná de kolom).

#### *Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid*

- Het scheidingsrendement van DP-systemen is veel hoger dan van conventionele destillatiekolommen, zodat met DP in beginsel het gewenste eindresultaat kan worden bereikt met minder scheidingsstappen.
- DP-systemen zijn in vergelijking tot conventionele destillatiekolommen niet wezenlijk verschillend ten aanzien van de primaire veiligheidsaspecten (de techniek an sich). Bij een combinatie van beide systemen wordt de omvang van de feed (doorzet) vooral bepaald door de capaciteit van de destillatiekolom.

| <b>Evaluatie</b>   |         |
|--|---------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Laag    |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Beperkt |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Nee     |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Ja      |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Nee     |
| 2. Marktrijpheid   | Hoog    |

### 2.1.5.6 Membrane extraction

#### *Omschrijving*

Bij Membrane extraction (ME) wordt het extractant van het procesmengsel geëxtraheerd/gescheiden door middel van een (vast of vloeistof) membraan.

ME met holle polymeerbuizen kan inmiddels als een conventionele membraantechniek worden beschouwd bij waterzuivering, biotechnologie en chemische analyse. In industriële productieprocessen verkeert de ME-techniek echter nog in een beginfase.

#### *Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid*

- Door het (verwachte) hogere rendement in scheidingsresultaat van ME zijn voor het gewenste scheidingsresultaat wellicht minder scheidingsstappen nodig in vergelijking tot destillatie, ofwel resulteert het in een beperkte reductie van de grootte van de installatie. Wel zijn de membraanvezels makkelijker modulair schaalbaar.

- Lagere operatietemperatuur dan bij conventionele distillatie, of lagere druk dan bij conventionele door drukverschil gedreven membraanscheiding.

| <b>Evaluatie</b>   |             |
|--|-------------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Hoog        |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Beperkt     |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Ja          |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Ja          |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Ja          |
| 2. Marktrijpheid   | Niet bekend |

## 2.2 Reactive

### 2.2.1 HEX reactors

#### *Omschrijving*

Bij een Heat EXchange reactor is een procesreactor gecombineerd met een warmtewisselaar, in één apparaat. Een HEX-reactor integreert menging en warmte-uitwisseling met de snelle, (zeer) exotherme (of endotherme), chemische reactie. De chemische reactie kan daardoor vloeiender verlopen bij de natuurlijke reactiesnelheid, zonder onderbreking of remming.

In varianten van HEX-reactoren kunnen zowel gekatalyseerde als niet-gekatalyseerde chemische processen worden uitgevoerd.

#### *Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid*

- Door de integratie van functies verloopt een chemisch proces in een HEX-reactor optimaler/soepeler dan in een conventionele, niet-geïntegreerde setting. Dat leidt onder meer tot kleinere kansen op verstoringen van het chemisch proces.
- Een HEX-reactor is compacter met een snellere doorlooptijd waardoor de aanwezige hoeveelheid reactant significant minder is dan bij conventionele reactorvaten.

| <b>Evaluatie</b>   |             |
|--|-------------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Hoog        |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Significant |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Nee         |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Ja          |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Ja          |
| 2. Marktrijpheid   | Hoog        |

## 2.2.2 Membrane reactors (selective, catalytic)

### Omschrijving

Een membraanreactor combineert in één apparaat een procesvat, waarin een chemische reactie plaatsvindt met een membraan dat processtoffen scheidt. Door de integratie beïnvloeden de chemische reactie en het scheidingsproces elkaar wederzijds. Dat betekent ook dat de chemische reactie en de membraanscheidingsfunctie op elkaar afgestemd moeten zijn.

### Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid

- De integratie van verschillende functies in één apparaat resulteert in minder procesonderdelen in vergelijking tot een conventionele opstelling met per functie een apart apparaat.
- Door de geïntegreerde membraanscheiding kunnen reactieproducten sneller worden weggenomen in vergelijking tot aparte procesonderdelen. Het bevordert de chemische reactiekinetiek en opbrengst in geval van evenwichtgelimiteerde reacties. Dat resulteert in kleinere proceshoeveelheden.

| Evaluatie  |             |
|--|-------------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Hoog        |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Significant |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Nee         |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Ja          |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Ja          |
| 2. Marktrijpheid   | Niet bekend |

## 2.2.3 Reactive adsorption

### 2.2.3.1 Simulated moving bed reactors

#### Omschrijving

Een SMBR combineert in één apparaat een reactiestap met een scheidingsstap (adsorptie). De laatste wordt uitgevoerd met een geïntegreerde continue tegenstroom chromatografie – vaak in een roterend of cyclisch systeem- wat een 'moving bed' simuleert. De integratie van reactie- en scheidingsstappen (in een chemische evenwichtsreactie) geeft een betere omzetting, meer en kwalitatief betere opbrengst in vergelijking tot een conventionele opstelling waarbij de genoemde processtappen in aparte devices worden uitgevoerd. Grootschalige, industriële toepassing vindt nog niet plaats. Daarvoor zullen eerst design studies nodig zijn. De ontwikkeling van geschikte adsorbents is nu nog een knelpunt.

### Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid

- Vanwege de verbeterde procesomstandigheden zijn voor deze hybride procesinstallatie beperkt kleinere proceshoeveelheden nodig in vergelijking tot de traditionele procesvoering.
- De integratie van verschillende functies in één apparaat resulteert in minder procesonderdelen in vergelijking tot een conventionele opstelling met per functie een apart apparaat.

| <b>Evaluatie</b>   |         |
|--|---------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Laag    |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Beperkt |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Nee     |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Ja      |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Nee     |
| 2. Marktrijpheid   | Midden  |

### 2.2.3.2 Rotating annulus chromatographic reactor

#### *Omschrijving*

In een RAC-reactor zijn de reactie- en de chromatografische scheidingsstap gecombineerd in één roterend, cilindrisch device. Met deze combinatie kan een chemische evenwichtsreactie naar de productzijde worden verschoven voor een betere opbrengst van het product. Tussen de twee concentrische cilinders bevindt zich de vaste fase van de chromatografische scheiding. De beide cilinders roteren om hun gemeenschappelijke as met een vaste draaisnelheid. Het eluens (loopvloeistof in het chromatografisch proces) wordt van boven gelijkmatig over de ringvorm ingevoerd. Het te scheiden mengsel wordt via een inlaat nozzle ingebracht.

Op een pilot na zijn er nog geen toepassingen op grote schaal uitgevoerd.

#### *Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid*

- Vanwege de verbeterde procesomstandigheden zijn voor deze hybride procesinstallatie beperkt kleinere proceshoeveelheden nodig in vergelijking tot de traditionele procesvoering.
- RAC is een veelbelovende techniek voor niche toepassingen in de fijnchemie, pharma en voedingsindustrie en heeft daarmee geen directe relevantie voor omgevingsveiligheid.

| <b>Evaluatie</b>   |         |
|--|---------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Laag    |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Beperkt |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Nee     |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Ja      |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Nee     |
| 2. Marktrijpheid   | Midden  |

### 2.2.3.3 Gas-solid-solid trickle flow reactor

#### *Omschrijving*

In een GSSTF-reactor worden een chemische reactie met gasvormige en vaste stoffen, een (heterogene) katalyse en een scheiding van stoffen gecombineerd in één device. De scheiding van stoffen vindt plaats door middel van kleine vaste deeltjes (adsorbent) die met de stroom mee of

tegen de stroom in van het reactiemengsel door de reactor bewegen en door contact met het reactiemengsel een selectieve stof binden c.q. worden gekatalyseerd c.q. bij exotherme reacties warmte afvoeren.

*Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid*

- Hogere conversiegraad leidt tot reductie of eliminatie van de recycle loop, resulterend in een beperkte vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie.
- Minder additionele installaties zoals compressor of warmtewisselaars nodig vanwege eliminatie van recycle of omdat de adsorbent ook voor het warmtetransport zorgt.
- Lagere operationele druk nodig in katalytische evenwichtsreactoren.

| <b>Evaluatie</b>   |         |
|--|---------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Midden  |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Beperkt |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Ja      |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Ja      |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Nee     |
| 2. Marktrijpheid   | Laag    |

#### **2.2.4 Reactive condensation**

*Omschrijving*

Een reactor waarin de producten van het chemisch proces direct worden gecondenseerd heeft vergelijkbare voordelen als reactive distillation (zie paragraaf 2.2.8). Er is te weinig informatie bekend over reactive condensation voor een evaluatie van de impact op omgevingsveiligheid.

*Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid*

Er is te weinig informatie bekend over reactive condensation voor een evaluatie van de relevante aspecten voor omgevingsveiligheid.

| <b>Evaluatie</b>   |             |
|--|-------------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Niet bekend |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | -           |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | -           |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | -           |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | -           |
| 2. Marktrijpheid   | Niet bekend |

#### **2.2.5 Reactive extraction (RE)**

*Omschrijving*

Reactive extraction is het gelijktijdig in een reactor plaatsvinden van de chemische reactie en het extraheren van de niet-mengbare

procesvloeistoffen. De niet-mengbare vloeistoffen kunnen zijn ontstaan uit de chemische reactie zelf of door toevoeging van één of meer solvents. De technologie uit de jaren zestig van de vorige eeuw wordt al op grote schaal toegepast in metallurgie. De extractietechniek lijkt op de gewone fysische extractie, maar is complexer.

*Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid*

- De procesintensificatievoordelen van deze techniek vertalen zich naar beperkt kleinere reactoren met een grotere doorzet ten opzichte van afzonderlijke procesinstallaties voor de reactie- en scheidingsstap.
- Door de integratie van meerdere processtappen in één installatie zijn er minder installatieonderdelen nodig.
- De integratie van de verschillende processtappen in één installatie maakt de installatie complexer (te bedrijven) dan elk afzonderlijke installatie.

| <b>Evaluatie</b>   |         |
|--|---------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Laag    |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Beperkt |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Nee     |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Ja      |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Nee     |
| 2. Marktrijpheid   | Hoog    |

### 2.2.6 Reactive absorption

*Omschrijving*

Bij reactieve absorptie wordt het oplossen van een gascomponent in een vloeistof bevorderd door een chemische reactie in de vloeistoffase. Reactieve absorptie wordt vooral gebruikt bij de productie van basischemicaliën zoals zwavel- of salpeterzuur, en voor het verwijderen van schadelijke stoffen zoals waterstofsulfide.

*Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid*

Vergeleken met een fysisch absorptieproces is bij RA geen verhoogde druk nodig en hoeven de geabsorbeerde stoffen ook niet sterk oplosbaar te zijn.

| <b>Evaluatie</b>   |         |
|--|---------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Laag    |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Beperkt |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Ja      |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Nee     |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Nee     |
| 2. Marktrijpheid   | Hoog    |



## 2.2.7 Reactive crystallization/precipitation

### Omschrijving

RC is het gelijktijdig in één reactor laten plaatsvinden van de chemische reactie en het via kristallisatie/precipitatie scheiden van proces(vloei)stoffen. Er is te weinig informatie bekend over reactive crystallization voor een evaluatie van de impact op omgevingsveiligheid.

### Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid

Er is te weinig informatie bekend over reactive crystallization voor een evaluatie van de relevante aspecten voor omgevingsveiligheid.

| Evaluatie  |             |
|--|-------------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Niet bekend |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | -           |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | -           |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | -           |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallele of decentrale toepassing (Ja/Nee)         | -           |
| 2. Marktrijpheid   | Niet bekend |

## 2.2.8 Reactive distillation

### 2.2.8.1 Reactive distillation

#### Omschrijving

Reactieve destillatie is het gelijktijdig in één reactor laten plaatsvinden van de chemische reactie en het via destillatie scheiden van proces(vloei)stoffen. Het reactie-evenwicht kan daarmee worden verschoven of er kan zelfs totale conversie bereikt worden. Bekende commerciële toepassingen zijn de productie van ethers (MTBE, TAME) en methylacetaat.

### Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid

- Door de integratie van reactie en scheiding in één installatie zijn er minder installatieonderdelen nodig.
- Eventueel vrijkomende reactiewarmte kan direct gebruikt worden voor de destillatie, waardoor er minder warmtewisselaars nodig zijn.
- Hogere conversiegraad leidt tot reductie of eliminatie van de recycle loop, resulterend in een beperkte vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie.

| Evaluatie  |         |
|--|---------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Laag    |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Beperkt |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Nee     |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Ja      |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallele of decentrale toepassing (Ja/Nee)         | Nee     |
| 2. Marktrijpheid   | Hoog    |

### 2.2.8.2 Membrane assisted reactive distillation

#### Omschrijving

Reactieve distillatie wordt in dit geval gecombineerd met een pervaporatiestap zoals ook eerder beschreven bij 2.1.5.5. In geval van azeotropen kan met membraanpervaporatie een betere scheiding worden bereikt zonder toevoeging van entrainer zoals bij extractieve distillatie (zie paragraaf 2.1.3) het geval is. Het proces is commercieel toegepast bij de productie van vetzuuresters en trimethylboraat.

#### Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid

- Door de integratie van reactie en scheiding in één installatie zijn er minder installatieonderdelen nodig.
- Eventueel vrijkomende reactiewarmte kan direct gebruikt worden voor de destillatie, waardoor er minder warmtewisselaars nodig zijn.
- Hogere conversiegraad en verbeterde scheiding leidt tot reductie of eliminatie van de recycle loop en vermijden van nageschakelde destillatiestappen, resulterend in een significante vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie.
- Door verbeterde scheiding met pervaporatie kunnen nageschakelde destillatiestappen vermeden worden.

| <b>Evaluatie</b>   |             |
|--|-------------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Midden      |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Significant |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Nee         |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Ja          |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Nee         |
| 2. Marktrijpheid   | Hoog        |

### 2.2.9 Other reactive

#### 2.2.9.1 Reactive comminution

##### Omschrijving

Bij reactive comminution wordt een chemische gas-vaste stof reactie in een maalinstallatie uitgevoerd. Het malen van de vaste stof zorgt voor verhoging van het reactieve oppervlak en mechanische activatie van de deeltjes waardoor een reactie bij lagere temperatuur kan plaatsvinden.

#### Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid

Er is te weinig informatie bekend over reactive comminution voor een evaluatie van de relevante aspecten voor omgevingsveiligheid.

| <b>Evaluatie</b>   |             |
|--|-------------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Niet bekend |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | -           |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | -           |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | -           |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | -           |
| 2. Marktrijpheid   | Niet bekend |

### 2.2.9.2 Reactive extrusion

#### *Omschrijving*

Reactive extrusion betreft de combinatie van reactie en extrusie en wordt meer en meer gebruikt in de polymeerindustrie.

#### *Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid*

Er is te weinig informatie bekend over reactieve extrusion voor een evaluatie van de relevante aspecten voor omgevingsveiligheid.

| <b>Evaluatie</b>   |             |
|--|-------------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Niet bekend |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | -           |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | -           |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | -           |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | -           |
| 2. Marktrijpheid   | Niet bekend |

## 3 Energy transfer

### 3.1 Rotating

#### 3.1.1 Centrifugal adsorption technology

##### *Omschrijving*

Roterende reactor waar onder invloed van de centrifugaal krachten een countercurrent flow ontstaat tussen vloeistof en adsorbent. Is geschikt voor zeer kleine adsorbentdeeltjes en maakt daarmee in vergelijking tot een conventionele fixed/fluidized bed adsorber een zeer compacte reactor met zeer korte contacttijd mogelijk.

##### *Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid*

- Zeer compacte reactor en korte contacttijd resulteert in een significante vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie.
- De compacte reactor is modulair schaalbaar en biedt mogelijkheden voor decentrale toepassing.

| <b>Evaluatie</b>   |             |
|--|-------------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Midden      |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Significant |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Nee         |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Nee         |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Ja          |
| 2. Marktrijpheid   | Niet bekend |

### 3.1.2 Centrifugal liquid-liquid contactor

#### Omschrijving

De combinatie van menging en scheiding onder invloed van hoge centrifugaalkrachten resulteert in vergelijking met een conventionele gravitatiescheider in een zeer compact apparaat.

#### Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid

- Zeer compacte reactor resulteert in een significante vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie.
- De compacte reactor is modulair schaalbaar en biedt mogelijkheden voor parallelle of decentrale toepassing.
- Ten opzichte van een conventionele gravitatiescheider is de roterende technologie gevoeliger voor falen als gevolg van vervuiling of vaste deeltjes in de productstroom.

| <b>Evaluatie</b>   |             |
|--|-------------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Midden      |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Significant |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Nee         |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Nee         |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Ja          |
| 2. Marktrijpheid   | Hoog        |

### 3.1.3 Rotating packed beds

#### Omschrijving

Door het toevoegen van rotatie aan een gestructureerd bed reactor (bijvoorbeeld gauze, random packed, foam of structured packing) wordt bij rotating packed beds een intensificatie van de menging, warmte- en/of massaoverdracht bewerkstelligd.

#### Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid

- Intensificatie resulteert in een beperkte vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (tot 80% kleiner reactorvolume).
- Ten opzichte van een conventionele gestructureerd bed reactor is de roterende technologie in zijn algemeen faalgevoeliger.

| <b>Evaluatie</b>   |         |
|--|---------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Laag    |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Beperkt |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Nee     |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Nee     |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Nee     |
| 2. Marktrijpheid   | Hoog    |

### 3.1.4 Rotor stator menger

#### *Omschrijving*

Een snel roterende as met complexe structuur zorgt voor pulserende stroming en afschuifkrachten en resulteert in intensieve menging (homogenisatie, emulsificatie, oplossing etc.). Intensieve menging heeft vooral verbeterde microstructuur en productkwaliteit als doel.

#### *Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid*

- Ten opzichte van conventionele statisch homogeniseerapparatuur wordt geen significante vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stof voorzien.
- Ten opzichte van conventionele statisch homogeniseerapparatuur is de roterende technologie in zijn algemeen faalgevoeliger.

| <b>Evaluatie</b>   |         |
|--|---------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Laag    |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Beperkt |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Nee     |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Nee     |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Nee     |
| 2. Marktrijpheid   | Hoog    |

### 3.1.5 Spinning disc reactor<sup>4</sup>

#### *Omschrijving*

Reactor met één of meer schijven op een draaiende as. Hoge afschuif- en centrifugaalkracht en een groot oppervlakte/volumeverhouding resulteren in significante intensificatie van menging, warmte- en massaoverdracht ten opzichte van conventionele batchreactoren.

#### *Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid*

<sup>4</sup> Er zijn twee typen spinning disc reactoren bekend: Dunne film en rotor-stator. In dit geval wordt de rotor-stator spinning disc geëvalueerd. Een dunne film spinning disc reactor bestaande uit een roterende schijf in een grote verzameltank. De tweede is een rotor-stator type, waarbij de roterende schijf (rotor) nauw omsloten wordt door de reactorwand (stator) met een typische afstand van een millimeter. In vergelijking met de dunne film reactor resulteert dit in hogere afschuifkrachten. Omdat het gehele reactorvolume in een rotor-stator spinning disc reactor vloeistof-gevuuld is, is de verblijftijd onafhankelijk regelbaar van de rotatiesnelheid.

- Intensificatie door centrifugaalkracht resulteert in significant kleiner reactorvolume en hoeveelheid gevaarlijke stof in de installatie.
- Kleine modulaire reactoren zijn mogelijk waardoor het ook geschikt is voor parallelle of decentrale toepassingen.
- Hoge warmteafvoercapaciteit en menging in combinatie met korte verblijftijd zorgen ervoor dat sterk exotherme reacties bij hoge druk en/of temperatuur kunnen verlopen terwijl tegelijkertijd de kans op runaway-reacties wordt beperkt.
- Dankzij hoge conversiegraad kan een nascheidingprocesstap vermeden worden.
- Ten opzichte van conventionele reactoren is de roterende technologie in zijn algemeen faalgevoeliger.

| <b>Evaluatie</b>   |             |
|--|-------------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Hoog        |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Significant |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Nee         |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Ja          |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Ja          |
| 2. Marktrijpheid   | Niet bekend |

### 3.1.6 Viscous heating device

#### *Omschrijving*

Verwarmingselement op basis van viskeuze warmtedissipatie met een draaiende schijf.

#### *Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid*

Er is te weinig informatie bekend over viscous heating devices voor een evaluatie van de relevante aspecten voor omgevingsveiligheid.

| <b>Evaluatie</b>   |           |
|--|-----------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Geen info |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | -         |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | -         |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | -         |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | -         |
| 2. Marktrijpheid   | Geen info |

## 3.2 Impulse

### 3.2.1 Ejector (venturi-)based reactor

#### *Omschrijving*

Een vloeistof-gasmengsel wordt met een (venturi-)mondstuk op hoge snelheid in een reactor gebracht, Door dissipatie van kinetische energie ontstaat intensieve menging (mixing shock) resulterend in een fijne

dispersie van zeer kleine gasbellen in de vloeistof. Massaoverdracht is vergelijkbaar met static mixers (zie paragraaf 1.1.4).

*Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid*

- Intensificatie door mixing shock resulteert in een beperkte vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stof in de installatie.
- Vanwege intensieve massaoverdracht kan de procesdruk gereduceerd worden.
- Dankzij hoge conversiegraad kan potentieel een nascheiding-processtap worden vermeden.

| <b>Evaluatie</b>   |           |
|--|-----------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Midden    |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Beperkt   |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Ja        |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Ja        |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Nee       |
| 2. Marktrijpheid   | Geen info |

### 3.2.2 Hydrodynamic cavitation based reactor

*Omschrijving*

Op basis van geforceerde hydrodynamische cavitatie kan intensieve menging en massaoverdracht worden bereikt bij milde procescondities in vergelijking met conventionele chemische synthese, extractie of homogenisatie reactoren.

*Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid*

- Operatie bij mildere procescondities (geen verwarming) vermindert de gevaarstelling van een ongewenste uitstroming.
- Intensificatie door cavitatie resulteert in een beperkte vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stof in de installatie.
- Dankzij hoge conversiegraad kan potentieel een cascade van batchreactoren vervangen worden door één reactor.

| <b>Evaluatie</b>   |         |
|--|---------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Midden  |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Beperkt |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Ja      |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Ja      |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Nee     |
| 2. Marktrijpheid   | Midden  |

### 3.2.3 Impinging streams reactors

#### Omschrijving

Intensieve menging, warmte- en massaoverdracht door productstromen in een reactor te laten botsen met elkaar of met een oppervlak in de reactor. Bij een IS-reactor voor chemische oxidatie met ozon is 85% kleiner reactorvolume gerapporteerd.

#### Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid

Intensificatie door botsen resulteert in een beperkte vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stof in de installatie.

| <b>Evaluatie</b>   |         |
|--|---------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Laag    |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Beperkt |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Nee     |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Nee     |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Nee     |
| 2. Marktrijpheid   | Hoog    |

### 3.2.4 Pulsed compression reactor

#### Omschrijving

Reactor op basis van adiabatische compressie en expansie met een vrij bewegende reciprocerende zuiger waarmee in korte tijd extreem hoge temperatuur en druk van de reactanten bereikt wordt. Reactor is ordegrrootte  $10^3 - 10^4$  kleiner dan conventionele reactoren. De technologie biedt een totaal nieuwe benadering voor de conventionele bulkproductie van olefines, synthese gas, waterstof, acetyleen etc.

#### Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid

- Intensificatie via adiabatische compressie en expansie resulteert in een significante vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stof in de installatie.
- Kleine modulaire reactoren zijn mogelijk waardoor het ook geschikt is voor parallelle of decentrale toepassingen.
- Door reversibele energieconversie in de reactor kunnen verwarming- en koelstappen voor en na de reactor worden vermeden.
- Ondanks dat er in korte tijd extreem hoge temperatuur en druk van de reactanten heerst, is de overall temperatuur van de reactor juist lager dan bij conventionele productieprocessen.

| <b>Evaluatie</b>   |             |
|--|-------------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Hoog        |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Significant |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Ja          |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Ja          |



| <b>Evaluatie</b>  |      |
|---|------|
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee) | Ja   |
| 2. Marktrijpheid  | Laag |

### 3.2.5 Sonochemical reactors

#### *Omschrijving*

Op basis van akoestische cavitatie kan intensieve menging en massaoverdracht worden bereikt bij milde procescondities in vergelijking met conventionele chemische synthese, extractie of homogenisatie reactoren.

#### *Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid*

- Operatie bij mildere procescondities (geen verwarming) vermindert de gevaarstelling van een ongewenste uitstroming.
- Intensificatie door cavitatie resulteert in een beperkte vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stof in de installatie.

| <b>Evaluatie</b>   |         |
|--|---------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Laag    |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Beperkt |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Ja      |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Nee     |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Nee     |
| 2. Marktrijpheid   | Midden  |

### 3.2.6 Ultrasound enhanced crystallization

#### *Omschrijving*

Op basis van akoestische cavitatie kan gecontroleerde initiatie van nucleatie en kristallisatie worden bereikt. Daarmee wordt voornamelijk verbetering van ultrafijne, nanostructuren bereikt en kunnen eventuele nageschakelde maal- of recrystallisatiestappen worden vermeden.

#### *Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid*

De techniek is voorzien als niche toepassing in de farmaceutische en voedingsindustrie en heeft daarmee geen directe relevantie voor omgevingsveiligheid.

| <b>Evaluatie</b>   |         |
|--|---------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Laag    |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Beperkt |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Nee     |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Ja      |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Nee     |
| 2. Marktrijpheid   | Laag    |

### 3.2.7 ultrasound reactors for enhanced disintegration/phase dispersion/mass transfer

#### Omschrijving

Het betreft in dit geval een meer specifieke applicatie van de sonochemical reactor (zie paragraaf 3.2.5) voor intensificatie van anaerobe vergisting van biomassa/sludge wat kan leiden tot 50% reductie van het vergistervolume.

#### Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid

Intensificatie door cavitatie resulteert in een beperkte vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stof in de installatie.

| <b>Evaluatie</b>   |         |
|--|---------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Laag    |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Beperkt |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Nee     |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Nee     |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Nee     |
| 2. Marktrijpheid   | Hoog    |

### 3.2.8 Supersonic Shockwave for Phase Dispersion

#### 3.2.8.1 Supersonic gas-liquid reactors

#### Omschrijving

Door gebruik te maken van de energie van supersonische schokgolven worden gasbelletjes op micrometerschaal geproduceerd. Daarmee wordt menging en massaoverdracht tussen gas en vloeistof in de reactor verbeterd. Het is vergelijkbaar met de ejector (venturi-)based reactor (zie paragraaf 3.2.1).

#### Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid

- Intensificatie door supersonische schokgolven resulteert in een beperkte vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stof in de installatie.
- Vanwege intensieve massaoverdracht kan de procesdruk gereduceerd worden.
- Dankzij hoge conversiegraad kan potentieel een nascheiding-processtap worden vermeden.

| <b>Evaluatie</b>   |         |
|--|---------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Midden  |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Beperkt |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Ja      |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Ja      |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Nee     |
| 2. Marktrijpheid   | Hoog    |

### 3.2.8.2 Supersonic gas-solid reactors

#### Omschrijving

Door gebruik te maken van de energie van supersonische schokgolven worden gasbelletjes op micrometerschaal geproduceerd en geïnjecteerd in een gas-vaste stof reactor. Daarmee wordt menging en massaoverdracht tussen gas en de vaste stof in de reactor verbeterd.

#### Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid

Intensificatie door supersonische injectie resulteert in een beperkte vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stof in de installatie.

| <b>Evaluatie</b>   |         |
|--|---------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Laag    |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Beperkt |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Nee     |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Nee     |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Nee     |
| 2. Marktrijpheid   | Hoog    |

### 3.3 Electro-magnetic

#### 3.3.1 Electric-field enhanced operations

##### 3.3.1.1 Electric field-enhanced extraction

#### Omschrijving

Een elektromagnetisch veld wordt toegepast om een vloeistof-vloeistof extractieproces of dispersieproces te verbeteren. Elektrische velden hebben als voordeel dat deze selectief op de interface van de vloeistoffen inwerkt en in mindere mate op de bulk van de vloeistof zoals bij mechanische energie het geval is.

#### Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid

Intensificatie van extractie en dispersie door elektrische velden resulteert in een significante vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stof in de installatie.

| <b>Evaluatie</b>   |             |
|--|-------------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Midden      |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Significant |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Nee         |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Nee         |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Ja          |
| 2. Marktrijpheid   | Hoog        |

### 3.3.1.2 Electric field-enhanced heat transfer

#### Omschrijving

Elektrische velden worden toegepast om de capaciteit van het warmtetransport van damp-/stoomsystemen te verbeteren (verbetering van de warmteoverdracht coëfficiënt en de pompcapaciteit ten opzichte van conventionele damp-/stoomleidingen).

#### Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid

- Intensificatie van warmtetransport door damp-/stoomleidingen met behulp van inductie van elektrische velden geeft mogelijkheden voor een simpeler ontwerp van het transportsysteem ten opzichte van conventionele leidingen. Een simpeler ontwerp reduceert mogelijk het aantal faalmechanismen (minder snel falen van het systeem).
- De techniek leidt echter niet tot schaalverkleining van de installaties.

| Evaluatie  |             |
|--|-------------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Laag        |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Beperkt     |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Nee         |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Nee         |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Nee         |
| 2. Marktrijpheid   | Niet bekend |

### 3.3.1.3 Electric field-enhanced mixing

#### Omschrijving

Elektrische velden kunnen het mengen van mengbare vloeistofstromen versnellen (verbetering van de ionendiffusie).

#### Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid

- De verbeterde performance van het mengproces van mengbare processtromen met behulp van inductie van elektrische velden heeft beperkte invloed op de schaalgrootte van de installatie.
- Mogelijkerwijs kan de installatie simpeler worden ontworpen, wat kan leiden tot een kleinere kans op falen.

| Evaluatie  |             |
|--|-------------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Laag        |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Beperkt     |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Nee         |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Nee         |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Nee         |
| 2. Marktrijpheid   | Niet bekend |

### 3.3.1.4 Andere toepassingen van elektrische velden

#### Omschrijving

Andere voorbeelden van toepassingen van elektrische velden met het doel om de performance van (chemische) processen te verbeteren zijn: het reduceren van aangroei in systemen, het verbeteren van de resolutie en de efficiency van adsorptieprocessen door het reduceren van de adsorptie van macromoleculen.

#### Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid

- De verbetering van de performance met behulp van inductie van elektrische velden heeft beperkte invloed op de schaalgrootte van de installatie.
- Mogelijkerwijs kan de installatie simpeler worden ontworpen, wat kan leiden tot een kleinere kans op falen.

| Evaluatie  |             |
|--|-------------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Laag        |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Beperkt     |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Nee         |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Nee         |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Nee         |
| 2. Marktrijpheid   | Niet bekend |

### 3.3.2 Induction + ohmic heating

#### Omschrijving

Voor de warmteopwekking worden elektrische bronnen gebruikt. Het verkrijgen van het thermisch effect vindt met verschillende technieken plaats: door middel van het leiden van een elektrische stroom door een materiaal (Ohmse warmte), door middel van het opwekken van (oscillerende) elektromagnetische velden met een bepaalde frequentie via een inductiespoel in de buurt van het op te warmen materiaal of via een microgolftchniek.

#### Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid

- De verbetering van de performance met behulp van inductie van elektrische velden heeft beperkte invloed op de schaalgrootte van de installatie.
- Mogelijkerwijs kan de installatie simpeler worden ontworpen, wat kan leiden tot een kleinere kans op falen.

| Evaluatie  |         |
|--|---------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Laag    |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Beperkt |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Nee     |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Nee     |

| <b>Evaluatie</b>  |        |
|---|--------|
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee) | Nee    |
| 2. Marktrijpheid  | Midden |

### 3.3.3 Microwave-enhanced operations

#### 3.3.3.1/3.3.3.2 Drogen en (voor)verhitten met microgolfstraling

##### *Omschrijving*

Met spreekt in het algemeen van microgolven wanneer de frequentie ervan zich in het frequentiebereik van 0,3 tot 300 GHz bevindt. Dat frequentiebereik komt overeen met een golflengtebereik van ongeveer 1 mm tot 1 m. Om interferentie te voorkomen met radar en telecommunicatietoepassingen – die in hetzelfde frequentiegebied opereren –, wordt voor industriële en consumententoepassingen van microgolven een standaard frequentie gereserveerd: meestal 2,45 GHz. Microgolven van deze frequentie kunnen moleculen met een permanente dipool, bijvoorbeeld watermoleculen, op een hoger energieniveau brengen. Door de ionenstroom in het oscillerende microgolfveld kan deze energie overgebracht worden naar andere materialen. Op deze wijze wordt de materie direct en gelijkmatig verwarmd. De mate van verwarming hangt af van de diëlektrische eigenschappen van het te verwarmen materiaal.

Verwarming met microgolftechniek verschilt fundamenteel van de conventionele manieren van verwarming via conductie.

Microgolftechnieken worden in de industrie al toegepast op installaties van industriële omvang.

##### *Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid*

- De verbetering van de performance met behulp van microgolftechnieken heeft beperkte invloed op de schaalgrootte van de installatie.
- Mogelijkerwijs kan de installatie simpeler worden ontworpen in vergelijking tot conventionele technieken, wat kan leiden tot een kleinere kans op falen.

| <b>Evaluatie</b>   |         |
|--|---------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Laag    |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Beperkt |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Nee     |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Nee     |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Nee     |
| 2. Marktrijpheid   | Hoog    |

#### 3.3.3.3 Toepassing van microgolfstraling bij scheidingsprocessen

##### *Omschrijving*

Met microgolfstraling kunnen sommige extractieprocessen beter worden uitgevoerd, zoals voor het extraheren van stoffen uit planten voor farmaceutische doeleinden. Ook is uit een beperkt aantal publicaties

bekend dat toepassing van microgolft technieken de membraanextractie en destillatie kunnen verbeteren.

*Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid*

- De verbetering van de performance met behulp van microgolft technieken heeft geen invloed op de schaalgrootte van een extractie- en destillatie-installatie.
- Mogelijkerwijs kan de installatie simpeler worden ontworpen in vergelijking tot conventionele technieken, wat kan leiden tot een kleinere kans op falen.

| <b>Evaluatie</b>   |             |
|--|-------------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Laag        |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Beperkt     |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Nee         |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Nee         |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Nee         |
| 2. Marktrijpheid   | Niet bekend |

**3.3.3.4.1 Microgolffreactoren voor reacties in de vloeistoffase; niet-gekatalyseerd of homogeen gekatalyseerd.**

*Omschrijving*

In de literatuur is beschreven dat reacties die via microgolft technieken worden verwarmd mogelijk met factoren 1000 of meer sneller kunnen verlopen. In sommige gevallen wordt ook een verbeterde productopbrengst waargenomen.

Microgolffreactoren zijn dus veelbelovend, met name voor kleine en middelgrote installaties in de fijnchemie, farmaceutische en consumentenproductenindustrie. De technologie bevindt zich echter nog in de eerste fase van ontwikkeling. Er zijn nog geen concrete data beschikbaar over wat de impact is op bijvoorbeeld de kosten, het energieverbruik en het milieu. Misschien dat bij een verschuiving van fossiele brandstof naar elektrisch microgolffreactoren interessant kunnen worden.

*Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid*

- Vanwege de mogelijke substantiële versnelling van het reactieproces en een verbeterde opbrengst van het product kunnen microgolffreactoren leiden tot aanzienlijk kleinere reactievaten.
- Mogelijkerwijs kan de installatie simpeler worden ontworpen in vergelijking tot conventionele reactoren, wat kan leiden tot een kleinere kans op falen.

| <b>Evaluatie</b>   |             |
|--|-------------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Midden      |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Significant |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Nee         |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Nee         |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Ja          |
| 2. Marktrijpheid   | Laag        |

### 3.3.3.4.2 Microgolfreactoren voor heterogeen gekatalyseerde processen

#### *Omschrijving*

Toepassing van microgolfstraling als ondersteuning bij heterogene katalyse heeft tot indrukwekkende resultaten geleid. Een voorbeeld is de gekatalyseerde oxidatieve koppeling van methaan tot ethaan en etheen die met microgolftechniekondersteuning bij een temperatuur kan plaatsvinden die 250 °C lager ligt dan met conventionele verwarming. De onderzoekers schrijven dit resultaat toe aan de vorming van methaan plasma en aan het zogenoemde 'arcing' effect, waarbij het plaatselijk ontstaan van een hoge energiedichtheid miniatuurexplosies teweeg kan brengen. Een andere mogelijke verklaring is dat de verwarming met microgolfstraling selectief plaatsvindt: bij de metaalnanodeeltjes en niet bij het dragermateriaal van de katalysator.

#### *Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid*

- Doordat een heterogeen gekatalyseerde reactie met microgolfstraling verwarming bij (veel) lagere temperatuur kan verlopen zijn faalmechanismen die te maken hebben met hogere temperaturen te vermijden.
- Toepassing van verwarming met behulp van microgolfstraling in plaats van conventionele warmtebronnen leidt niet direct tot verkleining van procesreactoren.
- De selectieve verwarming bij toepassing van microgolfstraling vereist kennis van de effectverschillen van microgolfstraling op verschillende stoffen. Dit kan leiden tot nieuwe faalmechanismen.

| <b>Evaluatie</b>   |         |
|--|---------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Laag    |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Beperkt |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Ja      |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Nee     |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Nee     |
| 2. Marktrijpheid   | Midden  |



### 3.3.3.4.3 Microgolfreactoren voor polymerisatie reactoren en het bewerken van polymeren

#### Omschrijving

Toepassing van microgolfstraling in polymerisatieprocessen kan leiden tot aanzienlijke verhoging van de processnelheid en kan ook de producteigenschappen beïnvloeden. Daarbij is de temperatuurbeheersing beter in vergelijking tot conventionele verwarmingstechnieken. Verwarming met microgolfstraling wordt al op industriële schaal toegepast voor het behandelen van diverse polymere materialen. Bij polymerisatiereactoren bevindt de techniek zich daarentegen nog in de eerste ontwikkelingsfase.

#### Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid

- Doordat het verhitten met microgolfstraling in vergelijking tot conventionele verwarmingstechnieken sneller en beter beheersbaar verloopt, kunnen faalmechanismen die te maken hebben met het verwarmingsproces worden beperkt.
- Toepassing van verwarming met behulp van microgolfstraling in plaats van conventionele warmtebronnen leidt niet direct tot verkleining van procesreactoren.
- Extra alertheid is vereist voor de gevoeligheid van de aanwezige processtoffen voor microgolfstraling. Dit kan leiden tot nieuwe faalmechanismen.

| <b>Evaluatie</b>   |         |
|--|---------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Laag    |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Beperkt |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Ja      |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Nee     |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Nee     |
| 2. Marktrijpheid   | Laag    |

### 3.3.4 Fotochemische reactoren

#### Omschrijving

Fotochemische reactoren gebruiken lichtenergie om chemische processen te initiëren of te katalyseren. Het licht heeft een frequentie die ligt tussen 200 en 400 nm (UV-licht) of tussen 400 en 700 nm (zichtbare licht). Infrarood licht wordt behoudens enkele specifieke toepassingen niet gebruikt in de chemische procesindustrie. Chemische verbindingen zoals reagentia of katalysatoren absorberen de lichtenergie waardoor deze een hogere reactiviteit krijgen naar de andere aanwezige processtoffen. Het concept van fotochemische reactoren wordt al toegepast bij de productie van coatings, inkt en verpakkingsmateriaal en in de elektronica-industrie. In de bulkchemie, de farmaceutische industrie en in de agrarische industrie zijn fotochemische reactoren nog schaars. De hogere kosten belemmeren vaak een ruimere toepassing.

*Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid*

- Met lichtenergie kan in vergelijking tot conventionele technieken het chemische proces al bij lagere temperatuur (kamertemperatuur) plaatsvinden, waardoor nevenreacties kunnen worden voorkomen. Laatstgenoemd aspect leidt daardoor tot een hogere selectiviteit van het chemische proces en tot verbetering van de conversie en van de opbrengst.
- Met een dergelijke procesoptimalisatie kunnen wellicht faalmechanismen die te maken hebben met procesinefficiëntie worden beperkt.
- Vanwege de verbeterde procesefficiëntie van fotochemische reactoren in vergelijking tot conventionele reactoren zijn in theorie kleinere procesreactoren mogelijk.

| <b>Evaluatie</b>   |         |
|--|---------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Midden  |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Beperkt |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Ja      |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Nee     |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Ja      |
| 2. Marktrijpheid   | Midden  |

**3.3.5 Plasma (gliding arc, glidarc) reactoren***Omschrijving*

'Gliding arc' is een nieuwe technologie waarbij plasma wordt gegenereerd door vorming van verschuivende (gliding) elektrische (boog)ontladingen. Een elektrische ontleding ontstaat waar de ruimte tussen twee elektroden het kleinst is, verschuift vervolgens langs de wijder lopende elektroden en groeit daarbij uit tot een boogontlading in de (gas)stroom. De boogontlading ioniseert het gas waarmee de chemische reactie wordt voortgezet. Daar waar de afstand tussen de elektroden te groot is om de boogontlading in stand te houden, verdwijnt deze.

Glidarc-toepassingen zijn op kleine schaal getest voor de omzetting van methaan naar acetyleen en waterstof, het afbreken van N<sub>2</sub>O, het opwerken van residuen van zware oliën, voor de activering van organische weefsels, bij het dissociëren van CO<sub>2</sub>, de bestrijding van luchtverontreiniging veroorzakende vluchtige stoffen etc.

Glidarc is een goedkope methode om goed beheersbare energie te genereren en kan chemische processen bij lagere temperatuur laten verlopen. De techniek is daarmee een alternatief voor thermische processen die veel energie verbruiken en bij hoge temperaturen worden uitgevoerd.

*Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid*

- Met Glidarc-plasmareactoren vindt het chemische proces bij lagere temperatuur plaats in vergelijking tot conventionele reactoren; koeling van het proces is dan niet meer nodig.
- Faalmechanismen die te maken hebben met een hoge procestemperatuur kunnen met Glidarc voorkomen worden.

- Het introduceren van ontladingen met een hoge spanning brengt nieuwe gevaren met zich mee.

| <b>Evaluatie</b>   |      |
|--|------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Laag |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Nee  |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Ja   |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Nee  |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Nee  |
| 2. Marktrijpheid   | Laag |

#### **4 Dynamic**

##### **4.1 Dynamic**

##### **4.1.1 Oscillatory baffled reactor and continuous oscillator baffled reactor technologies**

###### *Omschrijving*

De Oscillatory Baffled Reactor (OBR) is een alternatieve technologie voor warmteoverdracht of voor het mixen van vloeistoffen. De reactor bestaat doorgaans uit een cilindrische kolom waarin vinnen met openingen zijn aangebracht die op gelijke afstand van elkaar staan en op die wijze de kolom in gelijke cellen verdelen. Over de gehele kolom wordt de vloeistof in een oscillerende beweging gebracht, waardoor kleine draaikolken (vortices) ontstaan om de opening van de vin. De radiale bewegingen zijn aan de randen even groot van omvang als in het midden van de buis. In alle cellen over de gehele kolom vindt op deze wijze een gelijktijdige en gelijkmatige menging van de vloeistoffen plaats. Wanneer het wordt toegepast in een continu doorstromende buisreactor dan is de menggraad onafhankelijk van de stroom zodat een propsgewijze stroom en een significante reductie van reactorvolume mogelijk wordt.

De technologie is toepasbaar voor een breed scala aan reactietypen.

###### *Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid*

Met de OBR technologie kunnen mengprocessen in kleinschaligere reactoren plaatsvinden met een beter en consistentere mengresultaat en met minder bijproducten, in vergelijking tot de traditionele mengreactoren.

| <b>Evaluatie</b>   |             |
|--|-------------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Midden      |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Significant |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Nee         |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Nee         |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Ja          |
| 2. Marktrijpheid   | Hoog        |

#### 4.1.2 Reverse flow reactor

##### *Omschrijving*

In een reverse flow reactor worden met opzet één of meer procesvariabelen op vaste tijden verstoord. Deze dynamiek verbetert de procesvoering ten opzichte van een 'steady state' uitvoering. Bij exotherme processen benut een reverse flow reactor bijvoorbeeld de vrijgekomen warmte door de warmte binnen het katalysatorbed te houden of door ermee de koude reactorgassen voor te verwarmen. De verwachte voordelen zijn energiebesparing, verbeterde conversieselectiviteit en toename van de productiviteit. De mate van de dynamiek van een hoge reverse flow frequentie wordt bepaald door proces technische factoren als: de reactiekinetiek (exotherme, endotherme en evenwichtsreacties), de energieopslag, het reactorontwerp en de beheersing van het proces.

De technologie is voor het eerst toegepast om verontreinigingen uit de processtroom te verwijderen, maar heeft sindsdien een bredere aandacht gekregen. Reverse flow reactoren worden inmiddels veelvuldig gebruikt in multifunctionele units voor procesintegratie en energietransport. Voorbeelden zijn de oxidatie van SO<sub>2</sub> en koolwaterstoffen en de reductie van NO<sub>x</sub>.

##### *Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid*

Omdat met een reverse flow reactor de selectiviteit en de productiviteit van het proces verbetert, kan het proces incrementeel kleinschaliger ontworpen worden in vergelijking tot de traditionele reactoren.

| <b>Evaluatie</b>   |         |
|--|---------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Laag    |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Beperkt |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Nee     |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Nee     |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Nee     |
| 2. Marktrijpheid   | Hoog    |

#### 4.1.3 Multifase reactoren met pulsering

##### *Omschrijving*

Onderzoek naar geforceerde dynamische toepassing van chemische reactoren met het doel om de reactor performance te verbeteren, vindt al sinds de jaren zestig van de vorige eeuw plaats. Veel toegepast zijn terugkerende variaties in de processtroom (snelheid of richting) of in de inlaatconcentraties. Met een dynamische procesvoering kan de kinetiek van een proces positief worden beïnvloed. Een verhoging van de processnelheid van 50% of meer is mogelijk.

Voorbeelden van toepassingen: verbetering van de reactiekinetiek van adsorptie- en desorptieprocessen op het katalysatoroppervlak (gasfase-reactie met vaste katalysator), verhoging van de massaoverdrachtssnelheid (tricklebed reactor met pulsering),

verschuiving van het chemisch evenwicht in het proces of verbetering van de warmteoverdracht (reverse flow toepassing van een fixed bed katalysator reactor).

*Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid*

Omdat een multifase reactor met pulsering de reactiekinetiek positief beïnvloedt, kan het proces incrementeel kleinschaliger ontworpen worden in vergelijking tot de traditionele reactoren.

| <b>Evaluatie</b>   |             |
|--|-------------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Beperkt     |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Beperkt     |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Nee         |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Nee         |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallele of decentrale toepassing (Ja/Nee)         | Nee         |
| 2. Marktrijpheid   | Niet bekend |

**4.1.4 Drogen met behulp van pulserende (oscillerende) verbranding**

*Omschrijving*

Anders dan bij conventionele verbrandingsovens met een continue verbranding, vindt bij pulserende verbranding van vaste, vloeibare of gasvormige brandstoffen de verbranding fluctuerend plaats. Een dergelijke afwisselende verbranding genereert een warmtegolf waarbij druk en snelheid intenser worden. De warmtegolf plant zich vanuit de verbrandingskamer voort via een uitlaatventiel naar het procesvat, bijvoorbeeld een droogkamer. De oscillerende wijze van de warmtetoediening leidt tot een intensivering van de warmte- en massaoverdracht en daarmee tot een efficiënter en sneller droogproces. De verbrandingsoven waarbij de warmte pulserend wordt afgegeven, kan worden aangesloten op verschillende typen drogers: sproeidroger, roterende oven, pneumatische droger, cycloon droger of een fluid-bed droger. Met dergelijke pulserende drogercombinaties wordt een tot 40% grotere thermische efficiency bereikt ten opzichte van conventionele drogers, met een 2-5 maal grotere warmte- en massaoverdracht en een 10 maal grotere verbrandingsintensiteit.

Ondanks dat de techniek al jaren op de markt is, wordt deze nog niet veel toegepast. Technische hobbels zijn de geluidsproductie, de mechanische betrouwbaarheid, de beperkte mogelijkheden voor opschaling en het gebruik van alternatieve brandstoffen. Vooral vanwege de energiebesparingspotentie wordt de techniek als veelbelovend beschouwd. Mogelijke toepassingsgebieden zijn de vervaardiging van mineralen, chemische producten en voedingsmiddelen en bij de verwerking van afval.

*Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid*

Zolang de mechanische betrouwbaarheid van de techniek nog gebrekkig is en de toepassing ervan beperkt blijft tot kleinere installaties, wordt

geen relevante veiligheidsverbetering verwacht in vergelijking tot de conventionele droogsystemen.

| <b>Evaluatie</b>   |         |
|--|---------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Laag    |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Beperkt |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Nee     |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Nee     |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Nee     |
| 2. Marktrijpheid   | Midden  |

## **5 Overige**

### **5.1 Superkritisch**

#### **5.1.1 Superkritische reacties & 5.1.2 Superkritisch scheiden**

##### *Omschrijving*

Bij een superkritische reactie wordt een vloeistof gebruikt die zich in een (bijna) superkritische fase bevindt. Een vloeistof wordt superkritisch genoemd wanneer temperatuur en druk voorbij het kritische punt van die stof liggen.

In de superkritische fase bezit de stof eigenschappen die tussen vloeibaar en gasvormig liggen. Superkritische stoffen bezitten enerzijds eigenschappen die gelijk zijn aan de vloeistoffase (zoals de dichtheid), maar gedragen zich tegelijkertijd als gas met in vergelijking tot de vloeibare vorm een lagere viscositeit, een lagere oppervlaktespanning, een hogere compressibiliteit en een hogere diffusiviteit.

Deze eigenschappen maken de stof aantrekkelijk voor sommige chemische reacties, zoals scheidingsreacties (extractie). Door de voordelen van de superkritische eigenschappen van het reactiemedium te benutten kan de reactiesnelheid worden verhoogd en kan de reactieselectiviteit sterk worden verbeterd.

Tegenwoordig wordt superkritisch CO<sub>2</sub> veel gebruikt voor scheidingsprocessen. Maar ook superkritisch hexaan, pentaan en ammoniak zijn daarvoor bruikbaar. Met deze superkritische vloeistoffen kunnen waardevolle stoffen uit mengsels worden geëxtraheerd. De waardevolle stoffen blijven in hun pure vorm achter nadat de superkritische vloeistof door flashing/drukverlaging (zodat het een gas wordt) is verwijderd.

##### *Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid*

- In vergelijking tot de conventionele extractiemethoden met de niet-superkritische vorm van de extractievloeistof kan (een beperkte) veiligheidswinst worden behaald doordat het scheidingsproces sneller verloopt met een kwalitatief beter resultaat (terugwinning van de waardevolle processtof).
- Hoge druk en temperatuur in de superkritische fase en vervolgens het flashen van het superkritische extractiemiddel (het brengen in de gasfase) kan daarentegen extra risico's met zich meebrengen.

| <b>Evaluatie</b>   |         |
|--|---------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Laag    |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Beperkt |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Nee     |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Nee     |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Nee     |
| 2. Marktrijpheid   | Hoog    |

### 5.1.3 Cryogeen scheiden

#### *Omschrijving*

Cryogene scheidingstechnieken worden tegenwoordig bijna uitsluitend toegepast voor de productie van industriële gassen. In de toekomst liggen mogelijkheden voor cryogene scheidingstechnieken in de bulk- en fijnchemie.

Om gassen als argon, zuurstof en stikstof uit (omgevings)lucht te scheiden wordt het luchtmengsel onder druk gebracht en onder cryogene omstandigheden (gekoeld tot onder de kooktemperatuur van het luchtmengsel bij die druk) als vloeistof gedestilleerd. De destillatie vindt over twee destillatiekolommen plaats die thermisch gelinkt zijn maar onder verschillende druk werken. De damp uit de kolom met lagere temperatuur wordt gebruikt om de damp in de hogere-temperatuurkolom te condenseren. Het destillatieproces kan gevolgd worden door een cryogene adsorptiestap om eventuele verontreinigingen te verwijderen.

#### *Relevante aspecten voor omgevingsveiligheid*

Cryogene scheidingstechnieken zijn in feite reeds gangbare technieken bij de productie van industriële gassen. Voor deze sector zal het gebruik van deze techniek daarom niet tot verdere veiligheidswinst leiden. De techniek wordt bij andere chemische productieprocessen nog nauwelijks toegepast en zou daar in specifieke gevallen wellicht een beperkte veiligheidswinst kunnen opleveren.

| <b>Evaluatie</b><br>(voor andere chemische processen dan de productie van industriële gassen)  |             |
|--|-------------|
| 1. Potentie voor impact op omgevingsveiligheid   | Laag        |
| a. Vermindering van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen in de installatie (Significant/Beperkt) | Beperkt     |
| b. Vermindering van druk en/of temperatuur van de gevaarlijke stof in de installatie (Ja/Nee)  | Nee         |
| c. Vermindering van het aantal processtappen (Ja/Nee)  | Nee         |
| d. Mogelijkheid tot schaalverkleining voor parallelle of decentrale toepassing (Ja/Nee)        | Nee         |
| 2. Marktrijpheid   | Niet bekend |

**RIVM**

*De zorg voor morgen begint vandaag*